

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra aplikované mechaniky

## Modelování pružných struktur zhotovených metodou 3D tisku

## Modelling of 3D Printed Flexible Structures

Student:	Bc. Vojtěch Řepa
Osobní číslo:	REP0029
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Pavel Maršálek, Ph.D.

Ostrava 2020

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Řepa**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika  
Téma: **Modelování pružných struktur zhotovených metodou 3D tisku**  
**Modelling of 3D Printed Flexible Structures**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše problematiky
2. Návrh metodiky testování
3. Testování vybraných struktur
4. Počítačové modelování vybraných struktur
5. Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

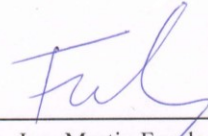
- [1] [1] SCHUMACHER, Christian, Steve MARSCHNER, Markus CROSS a Bernhard THOMASZEWSKI. Mechanical characterization of structured sheet materials. ACM Transactions on Graphics. 2018, 37(4). DOI: 10.1145/3197517.3201278. ISSN 07300301.
- [2] PANETTA, Julian, Qingnan ZHOU, Luigi MALOMO, Nico PIETRONI, Paolo CIGNONI a Denis ZORIN. Elastic textures for additive fabrication. ACM Transactions on Graphics. 2015, 34(4), 135:1-135:12. DOI: 10.1145/2766937. ISSN 07300301.
- [3] PÉREZ, Jesús, Bernhard THOMASZEWSKI, Stelian COROS, Bernd BICKEL, José A. CANABAL, Robert SUMNER a Miguel A. OTADUY. Design and fabrication of flexible rod meshes. ACM Transactions on Graphics. 2015, 34(4), 138:1-138:12. DOI: 10.1145/2766998. ISSN 07300301.
- [4] SCHUMACHER, Christian, Bernhard THOMASZEWSKI a Markus GROSS. Stenciling: Designing Structurally-Sound Surfaces with Decorative Patterns. Computer Graphics Forum. 2016, 35(5), 101-110. DOI: 10.1111/cgf.12967. ISSN 01677055.
- [5] ION, Alexandra, Johannes FROHNHOFEN, Ludwig WALL, et al. Metamaterial Mechanisms. Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '16. New York, New York, USA: ACM Press, 2016, 2016, , 529-539. DOI: 10.1145/2984511.2984540. ISBN 9781450341899.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Maršálek, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.  
vedoucí katedry

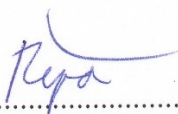


  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

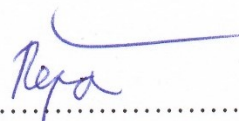
V Ostravě dne 18. května 2020.

  
.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.

  
.....  
Podpis studenta



## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŘEPA, V. *Modelování pružných struktur zhotovených metodou 3D tisku: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2020, 61 s. Vedoucí práce: Maršálek, P.

Práce se zabývá návrhem metodiky testování 3D tištěných pružných struktur za účelem stanovení jejich tuhosti a vytvořením počítačového modelu, kterým by bylo možné toto fyzické testování nahradit. V teoretické části jsou nejprve stručně charakterizovány typy struktur z geometrického hlediska a dále je popsána technologie 3D tisku, její metody a materiály vhodné pro výrobu pružných struktur. V praktické části je navržena zcela původní metodika testování, která je realizována na vybraných strukturách a zároveň je vyhodnocena tuhost těchto struktur. Následně je sestaven validovaný počítačový model pro výpočet tuhosti struktur. Další část práce se za pomoci počítačového modelu věnuje parametrické studii tuhosti třech vybraných typů struktur. Na závěr práce je představen počítačový model pro určování únosnosti struktur. Práce je zcela původní a její výsledky budou využity pro návrh biomedicínských aplikací.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŘEPA, V. *Modelling of 3D Printed Flexible Structures: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2020, 61 p. Thesis head: Maršálek, P.

This thesis deals with the design of methodology for testing of 3D printed flexible structures in order to determine their stiffness and with the creation of a computer model, which could replace this physical testing. The theoretical part first briefly characterizes the types of structures from a geometrical point of view and then describes the technology of 3D printing, its methods, and materials suitable to produce flexible structures. In the practical part, the original testing methodology is introduced, which is realized on selected structures and at the same time the stiffness of these structures is evaluated. Subsequently, a validated computer model for calculating the stiffness of structures is assembled. The next part of the work, using a computer model, deals with the parametric study of the stiffness of three selected types of structures. At the end of the work, a computer model for determining the maximal load of structures is presented. The work is completely original, and its results will be used for the design of biomedical applications.

# Obsah

Úvod.....	9
1 Rešerše problematiky .....	11
1.1 Symetrie struktur.....	11
1.2 3D tisk .....	12
1.3 Technologie 3D tisku .....	14
1.3.1 Metoda FDM.....	14
1.3.2 Metoda SLS .....	15
1.3.3 Metoda MJF .....	16
1.4 Materiály pro 3D tisk .....	17
1.4.1 Materiály metody FDM .....	17
1.4.2 Materiály metody SLS .....	19
1.4.3 Materiály metody MJF.....	20
1.5 Cíle práce .....	21
2 Návrh metodiky testování.....	22
2.1 Popis navržené metodiky testování.....	22
2.2 Příprava testování.....	23
2.2.1 Testovací vzorek .....	23
2.2.2 Testovací stojan a příruba pro uchycení vzorku .....	24
2.2.3 Testovací hlavy .....	26
3 Návrh geometrie pole pružných struktur .....	28
3.1 Příprava modelů pro výrobu vzorků pro testování.....	29
3.2 Volba parametrů vzorků pro testování .....	32
4 Testování vybraných struktur .....	33
4.1 Výsledky testování .....	34
4.2 Stanovení tuhosti struktur .....	35
5 Počítačové modelování vybraných struktur .....	38
5.1 Návrh počítačového modelu .....	38
5.2 Validace počítačového modelu .....	40
5.3 Parametrická studie .....	42
5.3.1 Výsledky parametrické studie.....	43
6 Modelování únosnosti vybraných struktur .....	47
6.1 Počítačový model.....	47
6.2 Výsledky výpočtu únosnosti struktur.....	50
7 Zhodnocení a závěr.....	54
Seznam použité literatury .....	58

## Seznam použitých symbolů a značek

Označení	Význam	Jednotka
3MF	Formát modelů pro 3D tisk	
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	
$b$	Parametr pole trojcípé hvězdy	[mm]
$b_1$	Parametr pole modifikované trojcípé hvězdy	[mm]
$b_2$	Parametr pole modifikované trojcípé hvězdy	[mm]
CAD	Computed aided design	
CPE	Kopolyester	
$d$	Parametr trihexagonálního pole	[mm]
DIC	Digitální korelace obrazu	
E	Modul pružnosti	[MPa]
$E_T$	Tečný modul	[MPa]
$F$	Síla	[N]
FDM	Fused Deposition Modeling	
$F_{maxM}$	Únosnost struktury stanovená z testování	[N]
$F_{maxV}$	Únosnost struktury stanovená výpočtem	[N]
$h$	Parametr trihexagonálního pole	[mm]
$k_m$	Tuhost struktury stanovená z měření	[N/mm]
$k_v$	Tuhost struktury stanovená z výpočtu	[N/mm]
$l$	Parametr pole trojcípé hvězdy	[mm]
MJF	Multi Jet Fusion	
OBJ	Formát souborů 3D geometrie	[mm]
$p$	Parametr pole trojcípé hvězdy, hexagonálního a trihexagonálního pole	[mm]
PA	Polyamid	
PAEK	Polyaryletherketon	
PC	Polykarbonát	
PEBA	Polyether block amid	
PEI	Polyéterimid	
PLA	Biologicky rozložitelný polyester z rostlinných materiálů	
PP	Polypropylen	
PS	Polystyren	
$R_l$	Poloměr vnitřní polokulové plochy vzorku	[mm]
$R_e$	Mez kluzu materiálu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti materiálu	[MPa]
SLS	Selective Laser Sintering	
STL	Formát CAD souboru	
$t$	Tloušťka struktury	[mm]
TPU	Termoplastický polyuretan	

$t_r$	Reálná tloušťka struktury	[mm]
$u$	Průhyb struktury	[mm]
UV	Ultrafialové záření	
-	-	-
$\mu$	Poissonovo číslo	[-]
$\Delta F_{max}$	Relativní rozdíl únosností	[%]
$\Delta_k$	Relativní rozdíl tuhostí	[%]
$\varepsilon_b$	Celková poměrná deformace při přetržení	[-]
$\varepsilon_{pb}$	Plastická deformace při přetržení	[-]
$\varepsilon_Y$	Poměrná deformace na mezi kluzu	[-]
$\rho$	Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_b$	Napětí při přetržení	[MPa]
$\sigma_Y$	Napětí na mezi kluzu	[MPa]



## Úvod

S nástupem a rozšířením technologie 3D tisku a její možností výroby prakticky libovolných tvarů součástí se otevřely nové možnosti návrhu komplexních geometrických struktur. Navržené struktury tak mimo jiné umožňují dosažení požadovaných mechanických vlastností, ať už jde o dosažení požadované tuhosti či deformačního chování, za současného snižování hmotnosti a výrobních nákladů.



Obr.1 Příklady aplikace pružných struktur

Zdroje: <http://awoltrends.com/2012/01/flexible-structures/>, <https://www.newbalance.com.au/pd/3d-printed-triplecell-echo/MTRPBV1-26124-M.html>, [https://wavecel.trekbikes.com/cz/cs\\_CZ/](https://wavecel.trekbikes.com/cz/cs_CZ/), <https://bigsee.eu/talee-3d-printed-cranial-orthosis-by-ales-grygar-czech-republic/>

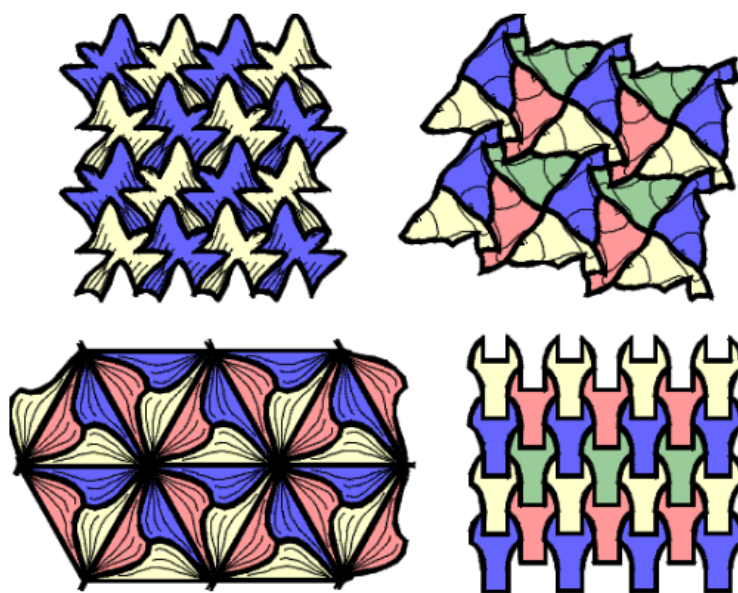
Vlastnosti celé struktury jsou zajištěny malými jednoduchými geometrickými tvary kombinovanými a sestavovanými do komplexních mřížkových polí. Zaplnění plochy takovouto kombinací jednoduchých tvarů se nazývá teselace nebo také mozaika či dlažba [1].

Teselace jsou díky své estetické rozmanitosti a atraktivitě používány zejména k dekoraci již od dávnověku, avšak lze se s nimi setkat i v přírodě např. včelí plástve. Nejsou však atraktivní jen z dekorativního hlediska. Tak, jak může být těmito strukturami dosaženo estetické komplexnosti, tak stejně může být dosaženo i komplexnosti mechanických vlastností. Vyrobené pružné struktury vykazují rozmanitou škálu makromechanických vlastností závislých na jejich geometrii a topologii, které však nejsou tak jednoznačně zřetelné z jejich vzhledu. Využití pružných struktur je čím dál tím častější. Mimo jiné se lze

s nimi setkat například u zdravotnických pomůcek, sportovního vybavení, ochranných pomůcek nebo i nábytku.

Existují teselace periodické, které jsou tvořeny opakujícími se tvary, neperiodické bez opakujících se tvarů a aperiodické, ve kterých se opakuje konečný počet tvarů, ale nelze nalézt žádnou opakující se část [1].

Struktury, kterými se tato práce zabývá vycházejí z isoedrálních teselací, což je speciální typ monoedrálních teselací. Monoedrální teselace je vyplnění plochy tvořené jedinou základní buňkou. Isoedrální teselace jsou tvořeny jedinou základní buňkou, a navíc mají translační symetrii. Základní buňka se může v celé teselaci vyskytovat stejně orientovaná, nebo v několika odlišně otočených a ozrcadlených orientacích, které do sebe zapadají a tvoří translační jednotku. Translační jednotku může tvořit skupina až 12 základních buněk. Základní buňky mají polygonální tvar. Translační symetrie znamená to, že se základní buňka nebo translační jednotka v určité orientaci periodicky opakuje v celé teselaci. Z kombinačního hlediska je definováno 93 odlišných typů isoedrálních teselací. [2][3]



*Obr.2 Příklady isoedrálních teselací [2]*

# 1 Rešerše problematiky














Návrh a analýza strukturovaných materiálů s požadovanými mechanickými vlastnostmi se stala v poslední době populárním tématem. Lze najít literaturu zabývající se různou problematikou. Jedna z prací [4] se například věnuje virtuálnímu prototypingu kraniálních ortéz, kdy byla představena numerická simulace pro náhradu fyzického testování tuhosti designu kraniální ortézy. Další z publikací [3] se zabývá charakterizací a vyšetřováním deformačního chování a optimalizací pružných plošných struktur, které jsou modelovány jako sítě nosníků. Byl zde charakterizován rozsáhlý soubor struktur, kdy byl každé struktuře předpovězen směrově závislý modul pružnosti, Poissonovo číslo a ohybová tuhost a byla vytvořena databáze ve které lze vyhledávat podle požadovaného typu struktury či dle požadovaných vlastností. Podobný přístup, kdy byly struktury uvažovány jako síť nosníků byl použit v článku [5]. Sítě zde byly navrhovány pro požadované deformační chování struktury. V práci [6] byly představeny různé kubické mikrostruktury, kterým bylo numerickými simulacemi předpovězeno jejich deformační chování a dále bylo představeno optimalizačně řízené vyplnění objektů těmito mikrostrukturami, za účelem dosažení požadovaného deformačního chování objektu při zatížení. V další publikaci [7] byly vytištěny různé prostorové struktury, kterým byly následně změřeny jejich deformační vlastnosti a za použití kombinace jednotlivých struktur bylo dosaženo požadovaného chování objektu. Za pomoci topologické optimalizace byly v práci [8] vytvářeny strukturované skořepiny s výřezy určitého tvaru. Díky vhodně orientovaných a umístěných polí geometrických struktur lze vytisknout i mechanismy, tzv. Metamateriálové mechanismy, o čemž pojednává článek [9]. Objektem zájmu je často také využití struktur s negativním Poissonovým číslem, tzv. auxetických struktur, jako například v práci [10].

## 1.1 Symetrie struktur

Na isoedrických teselacích pružných struktur, kterými se tato práce zabývá, lze pozorovat zjevnou vizuální pravidelnost, kterou lze popsat pomocí symetrií. Jednotlivé translační jednotky isoedrických teselací a tím pádem i celé teselace mohou mít dvou, tří, čtyř nebo šestičetnou osu rotační symetrie. Kromě rotačních os symetrie mohou isoedrické teselace mít i osy souměrnosti a skluzové roviny symetrie. Symetrie podle skluzové roviny je kombinací zrcadlení a posuvu ve směru osy zrcadlení. Osových souměrností může mít struktura až šest stejně jako v případě rotačních os symetrie. [2][3]

Zmiňované symetrie jsou čistě geometrického charakteru, avšak dle publikace [3] existuje závislost mezi geometrickými symetriemi a symetriemi materiálových vlastností vyrobených struktur, viz Obr. 1.1. Tato závislost je však jednostranná. Geometrie struktury určuje její symetrii materiálových vlastností. Konkrétní materiálovou symetrii však může struktura vykazovat, i když struktura nemá příslušnou geometrickou symetrii. To znamená,

že může například existovat struktura s izotropními vlastnostmi, která však nemá tři nebo šesti čtnou osu rotační symetrie a ani nemá tři nebo šest os souměrnosti. Důležitou vlastností materiálových symetrií je jejich vlastní rotační symetrie, kdy každá materiálová vlastnost je invariantní k rotacím o  $180^\circ$ . Tím pádem struktury s dvoučetnou rotační symetrií nepřidají žádné nové symetrie materiálovým vlastnostem. Struktury s tří a šestičetnými rotačními symetriemi vykazují stejnou odezvu materiálu ve směru alespoň tří os, a protože jsou všechny odezvy rotačně symetrické, musí být i každá další odezva taktéž rotačně symetrická, což dělá chování struktury izotropní.

<i>Geometric symmetry</i>		<i>Material symmetry</i>
 Twofold rotation	$\Rightarrow$	 Anisotropic
  One-axis reflection Two-axis reflection	$\Rightarrow$	 Orthotropic
  Fourfold rotation Four-axis reflection	$\Rightarrow$	 Tetragonal
    Threefold rotation Sixfold rotation Three-axis reflection Six-axis reflection	$\Rightarrow$	 Isotropic

Obr. 1.1 Závislost mezi geometrickými a materiálovými symetriemi struktur [3]

## 1.2 3D tisk

V současném výrobním průmyslu jsou výrobky vyráběny hlavně klasickými konvenčními procesy výroby jako např. obráběním, tvářením za tepla nebo studena či vstřikováním. Tyto procesy vycházejí ze zpracování polotovaru materiálu, kdy je materiál pro dosažení konečného tvaru odstraňován či tvarován pomocí forem a lisů. Opakem těchto metod je 3D tisk, nebo také aditivní výroba. Výroba pružných struktur je za pomoci



konvenčních výrobních metod často neproveditelná, či velmi obtížná, a proto bude v této kapitole stručně popsána historie 3D tisku, proces 3D tisku, výhody a nevýhody a poté budou představeny metody a materiály vhodné pro tisk zkoumaných pružných struktur.

Počátky 3D tisku lze datovat do 80. let 20. století, kdy byla v roce 1987 patentována technologie vytvrzování vrstev fotopolymeru UV laserem – stereolitografie. V průběhu 90. let 20. století pak byly představeny další technologie, např. FDM či SLS. Tyto technologie byly v počátcích velice nákladné a byly používány zejména pro výrobu průmyslových prototypů a ve výzkumu. To se změnilo až v roce 2009, kdy vypršel patent na technologii FDM a objevili se první levné a dostupné 3D tiskárny, což vedlo k významnému rozšíření možností využití těchto technologií. Uplatnění 3D tisku je v současnosti velmi široké, od domácího hobby použití, přes medicínu, automobilový průmysl až po letecký průmysl. [11]

Pojem 3D tisk lze definovat jako nekonvenční výrobní proces prototypů, či sériových dílů ke konečnému použití, založený na postupném přidávání souvislých vrstev materiálu, dokud není výrobek dokončen. Tyto vrstvy materiálu jsou v podstatě velmi úzké horizontální řezy daného výrobku. [11]

Počátkem procesu 3D tisku je připravený 3D geometrický model výrobku, který je nutné převést do některého z formátů kompatibilního se softwarem pro ovládání tiskáren, nejčastěji STL nebo také např. OBJ či 3MF. Tento model je v patřičném softwaru nařezán do tenkých horizontálních vrstev, na základě, kterých jsou vytvořeny instrukce ve strojovém kódu. V dalším kroku se již postup liší pro dané technologie 3D tisku. Může jít například o slinování tenkých vrstev materiálu ve formě prášku (metoda SLS), či nanášení vrstev roztaveného materiálu na tiskovou desku (metoda FDM). Používané materiály se také liší podle použité metody. Nejčastější jsou však různé druhy plastů, ale lze tisknout i kovy či některé další materiály. Vytisknuté výrobky se často musí dále zpracovat, aby bylo dosaženo požadovaného vzhledu či struktury povrchu. [11]

Jako každá jiná technologie má i 3D tisk své výhody a nevýhody oproti tradičním výrobním procesům. K největší výhodě 3D tisku patří výroba geometricky komplexních výrobků, které často nelze vyrobít žádnou jinou technologií. Další výhody pak jsou přizpůsobitelnost každého dílu, nízké počáteční náklady, úspora nákladů za materiál, poměrně široká škála používaných materiálů, rychlá výroba prototypů a urychlení vývojového procesu. [11]

Hlavní nevýhodou je nižší pevnost a anizotropní materiálové vlastnosti vytisknutého výrobku. Z důvodu procesu výroby vrstvu po vrstvě mají výrobky nižší pevnost a jsou křehčí ve směru tisku. Dalšími nevýhodami jsou omezená přesnost a tolerance, potřeba dokončovacího zpracování výrobků po tisku nebo cenová nevýhodnost v případě velkých objemů výroby. [11]

## 1.3 Technologie 3D tisku

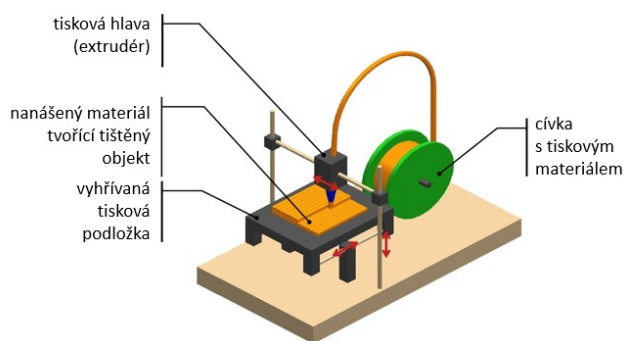
Existuje nemalé množství metod 3D tisku, které jsou dle normy ČSN EN ISO/ASTM 52900 [12] rozděleny do 7 skupin procesů. Jednotlivé skupiny se stručnou charakteristikou jsou uvedeny níže [13].

- **Binder Jetting** – Tekuté pojivo spojuje vybrané oblasti lůžka práškového materiálu
- **Direct Energy Deposition** – Zdroj vysoké energie taví materiál v průběhu ukládání
- **Material Extrusion** – Roztavený materiál je selektivně vytlačován tryskou
- **Material Jetting** – Kapky materiálu jsou postupně nanášeny a vytvrzeny
- **Powder Bed Fusion** – Zdroj vysoké energie selektivně taví, nebo slinuje práškový materiál
- **Vat Polymerization** – Tekutý fotopolymer je v nádobě vytvrzován UV světlem
- **Sheet Lamination** – Tenké desky materiálu jsou tvarovány a spojovány postupně jedna po druhé

Dále jsou podrobněji představeny metody 3D tisku, které byly dostupné a vhodné pro tisk zkušebních vzorků pro tuto diplomovou práci. Jedná se o metodu FDM patřící do skupiny Material Extrusion a metody SLS a MJF patřící do skupiny Powder Bed Fusion.

### 1.3.1 Metoda FDM

FDM neboli Fused Deposition Modelling je metoda patřící do skupiny Material Extrusion, při které je materiál ve formě struny namotané na cívce motorem podáván do tiskové hlavičky s vyhřívanou tryskou, kde se roztaví a je vytlačen. Vytlačený materiál se natavuje na vyhřívanou pracovní desku či na předchozí vytlačenou vrstvu. Tiskárna pohybem tiskové hlavičky vytlačuje materiál na požadované místa a až je vrstva dokončena, pracovní stůl se posune o daný krok a proces se opakuje, dokud není výrobek hotov. [14]



Obr. 1.2 Schéma technologie FDM

Zdroj: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>

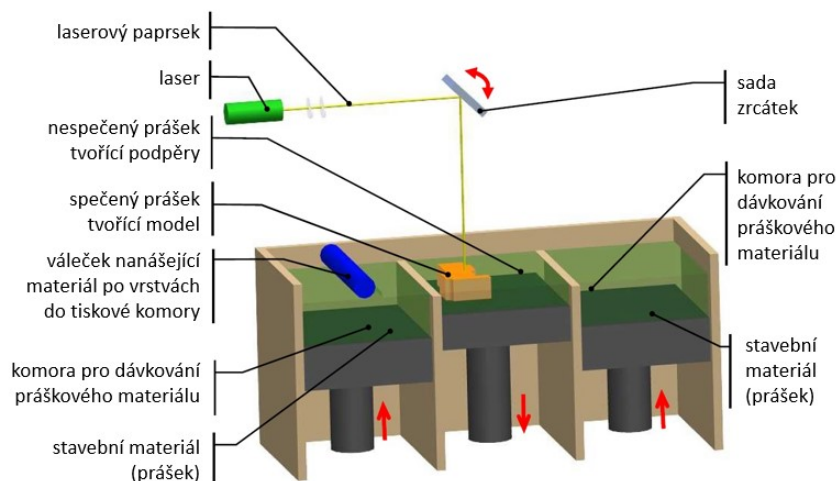
Při tisku výrobků s převisy je nutné také tisknout podpory. Plochy, které se tisknou z podpor mají horší kvalitu, doporučuje se tedy navrhovat výrobek tak aby měl minimum podpor. Podpory mohou být vytištěny ze stejného materiálu jako výrobek, nebo např. z materiálu rozpustitelného v kapalině. Při návrhu výrobků je také nutné uvažovat se smršťováním, jelikož se jednotlivé vrstvy materiálu ochlazují rozdílnou rychlostí. Kvalitu tisku také výrazně ovlivňuje vlhkost okolního prostředí. [14]

Materiály používané pro tisk touto metodou jsou různé druhy termoplastů jako například PLA, ABS, TPU, Nylon, PETG nebo PEI. [14]

FDM je nejrozšířenější metodou 3D tisku, hlavně díky cenové dostupnosti tiskáren a široké nabídce materiálů. Je vhodná na výrobu prototypů a zakázkových dílů. Tato metoda však má nejhorší rozměrovou přesnost a rozlišení v porovnání s jinými metodami. Na vytisknutých výrobcích jsou viditelné rozhraní mezi jednotlivými vrstvami, což vyžaduje dodatečné povrchové úpravy. Výrobky zhotovené touto metodou mají nezanedbatelné anizotropní vlastnosti. [14]

### 1.3.2 Metoda SLS

Pod zkratkou SLS se skrývá název metody Selective Laser Sintering, která spadá do skupiny Powder Bed Fusion. Při této metodě je nejprve na pracovní desku stavební komory nanášena vrstva práškového materiálu a poté CO<sub>2</sub> laser skenuje a ohřívá daná místa na ploše na teplotu blízkou teplotě tavení materiálu a tím se jednotlivé částičky slinují dohromady. Materiál v okolí, který nebyl slinován funguje jako podpora v případě převisů. Až je požadovaný průřez vrstvy hotov, pracovní deska se posune dolů o tloušťku jedné vrstvy, nanášecí mechanismus nanese další vrstvu materiálu a celý proces se opakuje. Po skončení tisku se musí výrobek ve stavební komoře ochladit a musí být vyjmut z neslinovaného prášku a očištěn. [15]



Obr. 1.3 Schéma technologie SLS

Zdroj: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>

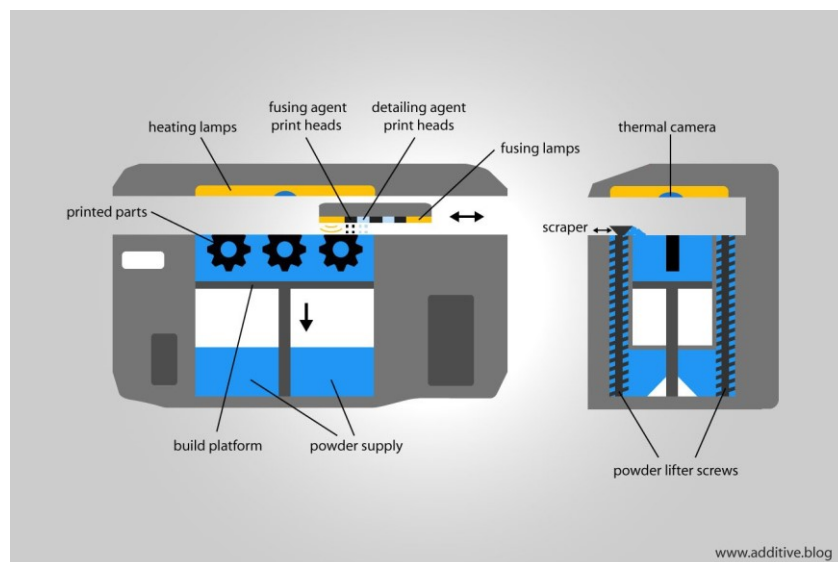
Pomocí SLS jsou výrobky tisknuty zejména z Nylonů PA 12 nebo PA 11, Nylonů se skelnými či uhlíkovými vlákny nebo z elastomeru TPU. Tato metoda umožňuje i tisk kovů. [15]

Touto metodou lze získat výrobky s téměř izotropními mechanickými vlastnostmi, díky tomu je používána k tisku prototypů funkčních částí ale i pro sériovou výrobu malých objemů. Při tisku nejsou potřeba podpory, takže je možné tisknout velice složité geometrie. Nevýhodou je vyšší cena systémů pro tisk metodou SLS v porovnání s jinými metodami, povrch s větší drsností, porézní struktura výrobků, riziko přeslinování a deformace velkých ploch po tisku. [15]

### 1.3.3 Metoda MJF

Metoda Multi Jet Fusion od firmy HP je jedna z nejnovějších metod 3D tisku. Patří stejně jako SLS do skupiny Powder Bed Fusion. Obě technologie jsou si velice podobné, avšak liší se ve způsobu slinování práškového materiálu. V případě MJF probíhá proces tisku následovně. Nejprve se nanese na pracovní desku vrstva práškového materiálu. Tisková hlava s tryskami poté nanese spojovací činidlo na místa, která je nutné slinovat a po obvodu vnějšího obrysu tištěného dílu je naneseno činidlo pro zajištění vysokých povrchových detailů výrobku. Následně nad pracovní deskou přejede zdroj infračerveného světla. Místa, kde bylo naneseno činidlo absorbují teplo a dochází ke slinutí materiálu. Prášek bez nanesených činidel zůstává nezměněn. Pracovní deska klesne o tloušťku vrstvy, nanese se nová vrstva prášku a proces probíhá znovu. Po dokončení tisku se před vyjmutím musí stavební komora s výrobkem a zbývajícím práškem ochladit. [16]





Obr. 1.4 Schéma technologie MJF

Zdroj: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/hp-multi-jet-fusion/>

V současnosti je tisk touto metodou dostupný pouze z nylonů PA 11 a PA 12 a z elastomeru TPU. V blízké době se však připravuje i tisk z polypropylenu. [17]

Hlavní přednosti této metody jsou rychlost tisku, velká recyklovatelnost použitého prášku, homogenní mechanické vlastnosti výrobků a nižší cena za vyrobený kus než u metody SLS. Nevýhody jsou podobné jako u SLS větší drsnost povrchu, deformace velkých ploch, pořizovací cena systémů pro tisk, a hlavně užší výběr materiálů ze kterých lze tisknout. [16]

## 1.4 Materiály pro 3D tisk

Každá z metod 3D tisku umožňuje tisk za použití odlišných materiálů. Obecně se nejčastěji tisknou plasty, a to zejména termoplasty (např. ABS, PLA, Nylon, TPU), ale i termosety (pryskyřice). Další materiály, ze kterých lze provádět tisk jsou různé kompozity, kovy a dokonce i keramika. Každý z materiálů má jiné vlastnosti, ovlivňuje kvalitu a strukturu výrobku, a proto je vhodný pro jiné aplikace. Existuje nespočet variací používaných materiálů a jejich dodavatelů. Proto jsou v následujících kapitolách popsány pouze materiály, které jsou používány při tisku technologiemi, které byly výše představeny. U metodu FDM jde o materiály od firmy Ultimaker, v případě metody SLS jde o materiály firmy EOS a pro metodu MJF jsou to materiály firmy HP a BASF.

### 1.4.1 Materiály metody FDM

Portfolio materiálů pro tisk metodou FDM od firmy Ultimaker je široké [18]. V nabídce této firmy jsou materiály jako PLA, ABS, CPE a PC. Ty však nejsou vhodné pro aplikaci, kterou se zabývá tato práce, zejména z důvodu vysoké tuhosti. Dále jsou dostupné materiály

pro tisk podpor. Jako nejvhodnější se pro tuto práci z nabízených materiálů jeví materiály TPU 95A, Nylon a PP.

TPU 95A je semiflexibilní termoplastický polyuretan s dobrou odolností vůči opotřebení a otěru, vysokou rázovou pevností, velkou průtažností a dobrou chemickou odolností. Vytisknuté vrstvy tímto materiálem vynikají dobrou adhezí. Doporučuje se pro tvorbu funkčních prototypů, svorek, závěsů a dílů nasazovaných zacvaknutím. Je nevhodný pro aplikace, kde je vystaven teplotám nad 100 °C, dlouhodobému působení UV záření, pro aplikace v kontaktu s potravinami a pro použití in vivo. [18]

Nylon od firmy Ultimaker je založen na polyamidu PA6/66. Tento materiál má vysokou odolnost proti rázu, vysoký poměr pevnosti k hmotnosti, nízký koeficient tření, nižší absorpci vlhkosti než ostatní nylony a má dobrou odolnost vůči alkáliím a organickým chemikáliím. Je vhodný pro výrobu funkčních prototypů, nástrojů a k průmyslovému modelování. Aplikace s působením teplot nad 80 °C a aplikace v kontaktu s potravinami či in vivo nejsou doporučovány. [18]

PP neboli polypropylen se vyznačuje dobrou trvanlivostí, odolností vůči únavě materiálu, vysokou houževnatostí, nízkým koeficientem tření, semiflexibilitou, dobrou chemickou odolností a odolností proti vlhkosti. Materiál je průhledný a díky nízké objemové hmotnosti jsou výrobky lehké s vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti. Je vhodný pro výrobu funkčních prototypů, závěsů, konektorů, obalů, ochranných krytů nebo pro výrobu laboratorního vybavení. Aplikace, kde je v kontaktu s potravinami a použití in vivo se opět nedoporučuje. Také aplikace, kde je díl vystaven působení teplot vyšších než 105 °C nejsou vhodné. [18]

Materiálové vlastnosti těchto materiálů poskytované výrobcem jsou uvedeny v Tab. 1. Výrobce v tomto případě neuvádí vlastnosti ve směru normály tiskové podložky (osa  $z$ ), ale pouze ve směrech rovnoběžných s tiskovou podložkou, tedy v osách  $x$  a  $y$ .

Tab. 1 Materiálové vlastnosti vybraných materiálů FDM tisku [18]

Veličina	Jednotka	TPU 95A	Nylon	PP
Modul pružnosti v tahu $E$ v ose $x, y$	[MPa]	26	579	220
Mez kluzu $R_e$ v ose $x, y$	[MPa]	8,6	27,8	8,7
Mez pevnosti v tahu $R_m$ v ose $x, y$	[MPa]	39	34,4	Bez přetržení ve zkušebním rozsahu
Poměrné prodloužení na mez kluzu $\varepsilon_Y$ v ose $x, y$	[%]	55	20	18
Poměrné prodloužení při přetržení v $\varepsilon_b$ ose $x, y$	[%]	580	210	>300
Hustota $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1220	1140	890

## 1.4.2 Materiály metody SLS

Nabídka plastových materiálů firmy EOS je taktéž rozmanitá a zahrnuje materiály jako je PA, PS, TPU či PAEK [19]. Z nabízených materiálů se jako optimální pro použití nabízí materiály z polyamidu 11 a 12 jako např. PA 1101/1102, PA 2200/2201, PrimePart® PLUS PA 2221 anebo z termoplastického elastomeru – PrimePart® ST PEBA 2301.

PA 1101/1102 jsou prášky polyamidu 11. Tento materiál se vyznačuje dobrou flexibilitou a odolností proti nárazu, poměrně vysokým prodloužením při přetržení. Má vyvážené vlastnosti v širokém rozsahu teplot, dobrou odolnost proti chemikáliím a je biokompatibilní dle ISO 10993. [19]

Materiály PA 2200/2201 jsou práškové polyamidy 12. Jde o víceúčelový materiál s vysokou pevností a tuhostí, dlouhodobým konstantním chováním a dobrou chemickou odolností. Tento materiál dovoluje tisk s vysokým rozlišením detailů a jsou dostupné různé dokončovací úpravy. Materiál je biokompatibilní v souladu s ISO 10993 a je schválen pro styk s potravinami v souladu se směrnicí EU o plastech 2002/72/ES. [19]

Termoplastický elastomer PrimePart® ST PEBA 2301 je materiál s vysokou pružností a pevností, dlouhodobým stabilním chováním, dobrou chemickou odolností. Vyznačuje se vysokými detaily rozlišení a jsou možné různé dokončovací operace. Schází však certifikace biokompatibility. [19]

Některé vlastnosti těchto materiálů udávané výrobcem jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Materiálové vlastnosti vybraných materiálů SLS tisku [19]

Veličina	Jednotka	PA 1101	PA 2200	PrimePart® ST PEBA 2301
Modul pružnosti v tahu $E$ v ose $x, y$	[MPa]	1600	1650	75
Modul pružnosti v tahu $E$ v ose $z$	[MPa]	1600	1650	80
Mez pevnosti v tahu $R_m$ v ose $x, y$	[MPa]	48	48	8
Mez pevnosti v tahu $R_m$ v ose $z$	[MPa]	48	42	7
Poměrné prodloužení při přetržení $\varepsilon_b$ v ose $x, y$	[%]	45	18	200
Poměrné prodloužení při přetržení $\varepsilon_b$ v ose $z$	[%]	30	4	70
Hustota (po tisku) $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	990	930	950

### 1.4.3 Materiály metody MJF

Nabídka materiálů pro tisk metodou MJF není tak rozsáhlá jako v případě metody FDM nebo SLS, jelikož se jedná o velmi mladou technologii. Dostupné materiály jsou práškové polyamidy PA 11, PA 12 a PA 12 s příměsí skla od firmy HP a elastomer TPU od firmy BASF. [17] Vhodné materiály pro tisk pružných struktur jsou popsány níže.

HP 3D High Reusability PA 11 je materiál vyrobený z obnovitelných zdrojů, má vysokou pružnost a odolnost vůči nárazu, dobrou hodnotu prodloužení při přetržení, skvělou chemickou odolnost a je biokompatibilní v souladu s ISO 10993. [17]

Materiál HP 3D High Reusability PA 12 je pevný a odolný, má vysokou objemovou hmotnost a vyvážené vlastnosti, dobrou chemickou odolnost, vyznačuje se vysokou recyklovatelností a je také biokompatibilní. [17]

Elastomer Ultrasint TPU01 od firmy BASF pro technologii tisku MJF vyniká vysokou přesností tisku, výbornou kvalitou povrchu, dobrou flexibilitou, odolností proti opotřebení, tlumením nárazů, dobrou tepelnou stabilitou a také vysokou recyklovatelností. [20]

V Tab. 3 jsou uvedeny některé výrobcem udávané vlastnosti výše popsaných materiálů.

Tab. 3 Materiálové vlastnosti vybraných materiálů MJF tisku [17] [20]

Veličina	Jednotka	HP 3D High Reusability PA 11	HP 3D High Reusability PA 12	Ultrasint TPU01
Modul pružnosti v tahu $E$ v ose $x, y$	[MPa]	1800	1700	75
Modul pružnosti v tahu $E$ v ose $z$	[MPa]	1800	1800	85
Mez pevnosti v tahu $R_m$ v ose $x, y$	[MPa]	50	48	9
Mez pevnosti v tahu $R_m$ v ose $z$	[MPa]	50	48	7
Poměrné prodloužení při přetržení $\varepsilon_b$ v ose $x, y$	[%]	50	20	220
Poměrné prodloužení při přetržení $\varepsilon_b$ v ose $z$	[%]	50	15	120
Hustota (po tisku) $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1040	1010	1100



## 1.5 Cíle práce

Aplikace těchto struktur často vyžadují splnění klíčových požadavků na jejich tuhost. Například v případě biomedicínských aplikací jsou struktury používány na ortézách, kde se musí přizpůsobit tvaru části těla uživatele, ale zároveň poskytnout i dostatečnou podporu. Tato práce se tedy zabývá zkoumáním tuhosti vybraných plošných isoedrických pružných struktur zhotovených práškovou metodou 3D tisku SLS. Dílčí cíle práce jsou:

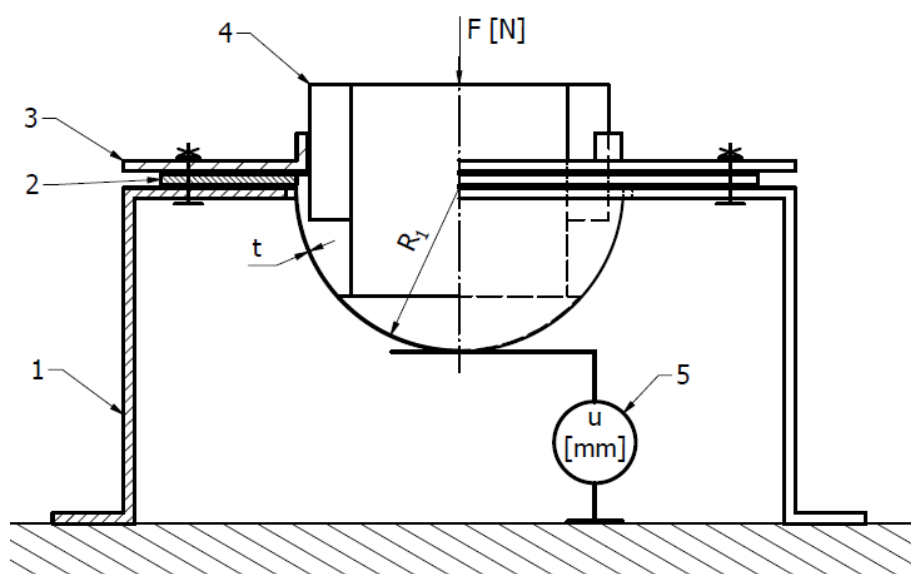
- 1) Navrhnout metodiku testování struktur za účelem stanovení jejich tuhosti
- 2) Navrhnout vybrané geometrie pole struktur pro testování
- 3) Realizovat testování vybraných struktur a vyhodnotit jejich tuhost
- 4) Vytvořit počítačový model pro výpočet tuhosti struktur, se kterým by bylo možné nahradit jejich fyzické testování
- 5) Provést parametrickou studii tuhosti několika vybraných struktur za pomoci počítačového modelu
- 6) Stanovit únosnost vybraných struktur prostřednictvím počítačového modelu

## 2 Návrh metodiky testování

V této kapitole je popsána navržená metodika testování a také jsou představeny součásti přípravku pro provádění těchto testů. Při tvorbě metodiky testování posloužilo jako inspirace již existující testování tuhosti pružných struktur vnitřní strany kraniální ortézy v článku [4].

### 2.1 Popis navržené metodiky testování

Aplikace těchto struktur mnohdy nemají rovinný charakter, ale jde o plochy různých tvarů. Takovéto tvary často mohou být blízké polokulovým plochám jako v případě zmiňovaných kraniálních ortéz či ochranných helem. Pro potřeby navrhované metodiky testování byly proto uvažovány vzorky struktur ve tvaru polokulové plochy o vnitřním poloměru  $R_l = 65$  mm a zvolené tloušťce  $t$ . Takovéto vzorky byly uloženy do zkušebního přípravku. Ten tvořil zejména stojan, do kterého byl vzorek vložen. Uchycení vzorku ve stojanu bylo zajištěno šrouby po obvodu vycházející ze stojanu, na které byl nasazen testovaný vzorek a na ten byla nasazena příruba, která byla přitlačena na vzorek pomocí matic. Vzorek struktury byl takto sevřen mezi stojanem a přírubou a zajištěn proti nechtěnému pohybu. Zvolené zatěžování bylo aplikováno přes standardizované zatěžovací hlavy, o velikosti 25 % vnitřní polokulové plochy vzorku. Tyto hlavy byly zatěžovány pomocí závaží o požadované hmotnosti nebo pomocí trhačího stroje. Průhyb struktury vzorku byl odečítán ze záznamu trhačího stroje, anebo měřen například pomocí posuvného měřítka. Schéma navrhované metodiky lze vidět na Obr. 2.1. Výstupem testování pomocí této metodiky byla závislost průhybu vzorku na jeho zatížení, ze které byla následně stanovena tuhost testované struktury.



Obr. 2.1 Schéma navrhované metodiky testování. 1 - Stojan, 2 - Vzorek, 3 - Příruba, 4 - Zatěžovací hlava,  $F$  – Požadované zatížení, 5 – Měření průhybu struktury

V případě testování vzorků pro tuto práci bylo využito kapacit Katedry aplikované mechaniky VŠB – TU Ostrava. Zatěžování vzorků, měření působící síly a průhybu vzorků struktury bylo realizováno na trhačím stroji Testometric M500-50CT, viz Obr. 2.2.



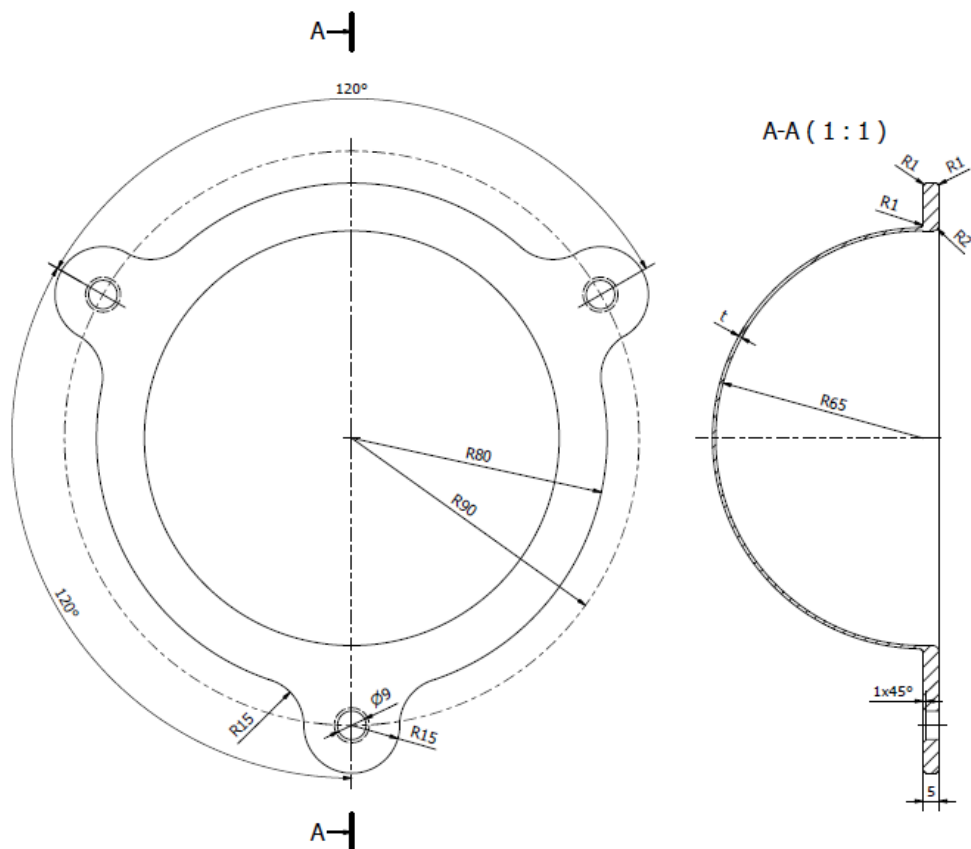
*Obr. 2.2 Testování vzorků dle navržené metodiky*

## **2.2 Příprava testování**

Pro provedení výše popsané metodiku testování byl navržen tvar testovacího vzorku a potřebné součásti testovacího přípravku. CAD modely všech součástí byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor 2020 a poté byla většina z nich vyrobena pomocí práškové technologie 3D tisku SLS z polyamidu PA12. Testovací přípravek byl tvořen stojanem, přírubou a zatěžovacími hlavami.

### **2.2.1 Testovací vzorek**

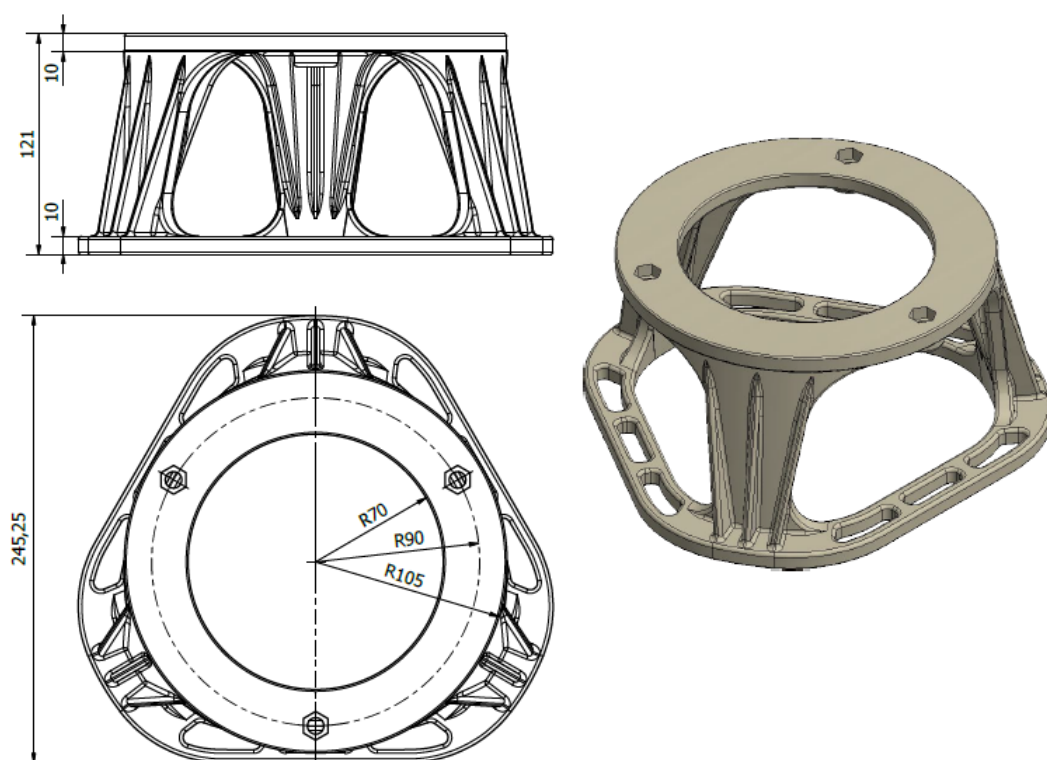
Nejprve byl navržen tvar a rozměry testovacího vzorku. Jak již bylo řečeno, tvar struktury vzorku byl definován jako polokulová plocha s vnitřním poloměrem  $R_I = 65$  mm s proměnnou tloušťkou vzorku  $t$  dle zkoumané struktury. Na tuto polokulovou plochu navazuje okraj o tloušťce 5 mm s otvory pro tři rovnoměrně rozmístěné šrouby M8 pro uchycení v přípravku. Tvar vzorku je zobrazen na Obr. 2.3. Polokulová plocha, kde by měla být pružná struktura je pro lepší ilustraci zobrazena jako plná plocha.



Obr. 2.3 Tvar a rozměry testovacího vzorku

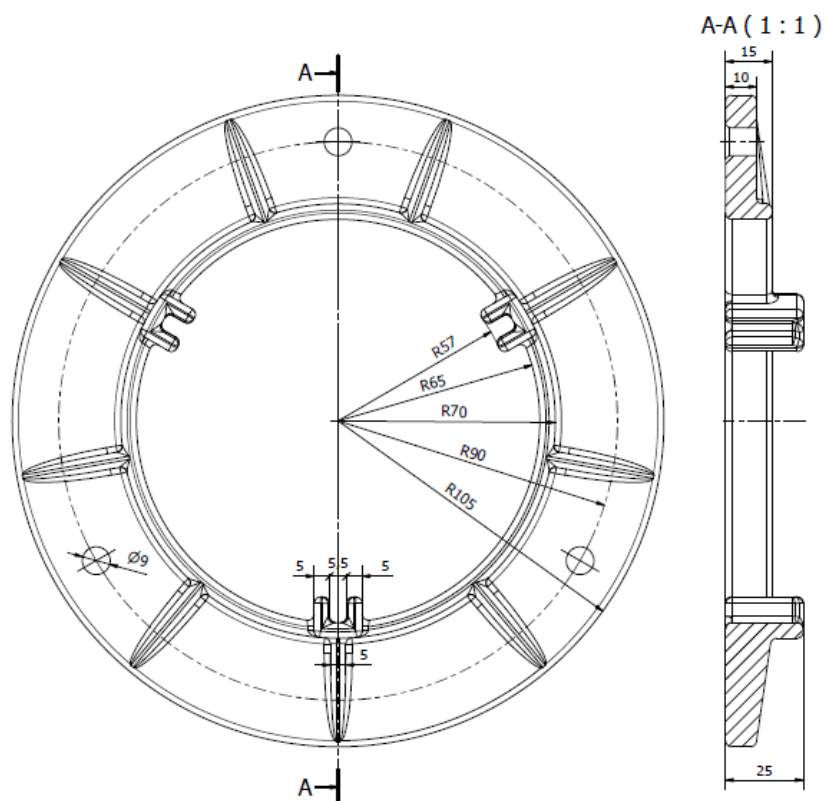
### 2.2.2 Testovací stojan a příruba pro uchycení vzorku

Hlavní součástí přípravku je stojan, ve kterém je vzorek umístěn. Při návrhu stojanu byl kladen důraz na jeho robustnost. V tomto stojanu je otvor pro vzorky do tloušťky stěny  $t = 5$  mm. V místech děr šroubů pro uchycení vzorku jsou připraveny otvory pro matice M8 kvůli toho, aby šrouby při výměně vzorku zůstali ve stojanu a nebylo by potřeba je znovu nasazovat. Horní část s otvorem pro vzorek a pro šrouby stojí na třech vyztužených nohách spojených ve spodní části, kde jsou připraveny drážky pro případné uchycení k podložce. Stojan lze vidět na Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Stojan testovacího přípravku

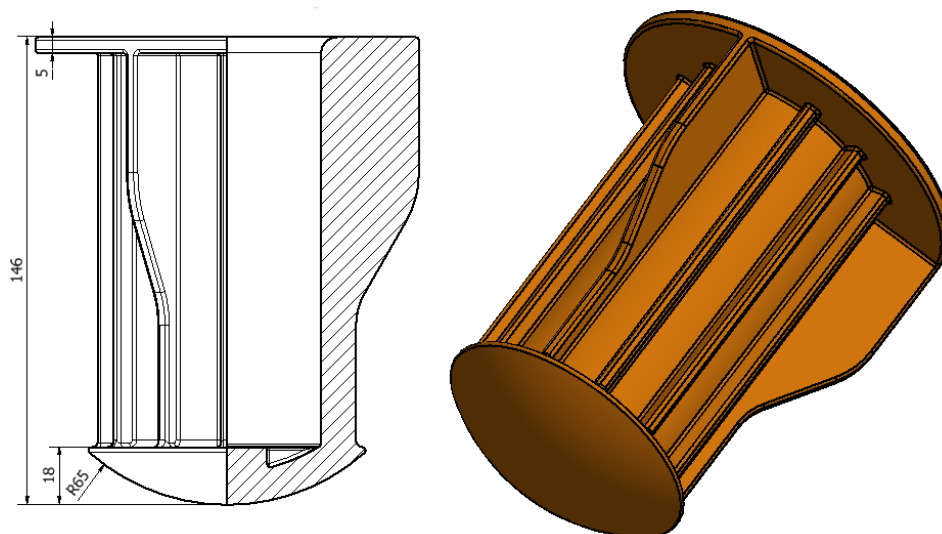
Z vrchní strany je ve stojanu vzorek zajištěn pomocí příruby s třemi vodícími drážkami pro zatěžovací hlavy, viz Obr. 2.5.



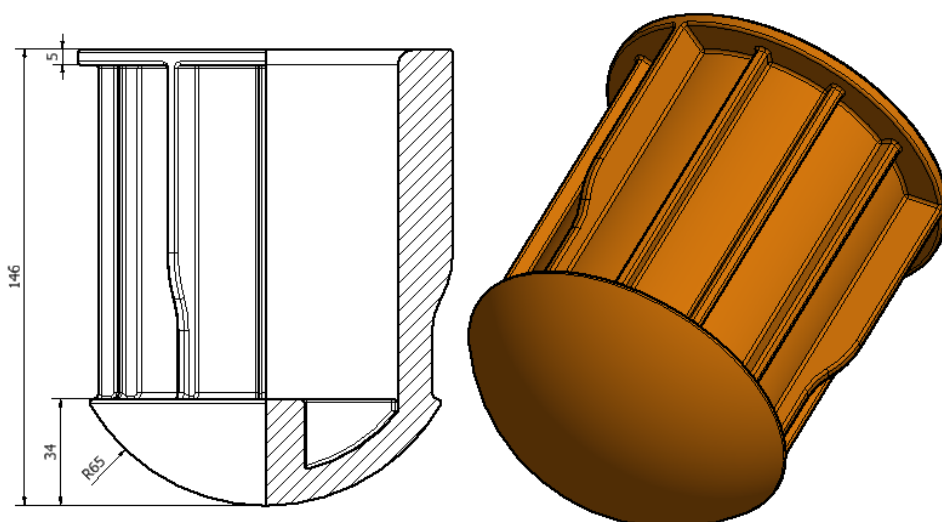
Obr. 2.5 Příruba testovacího přípravku

### 2.2.3 Testovací hlavy

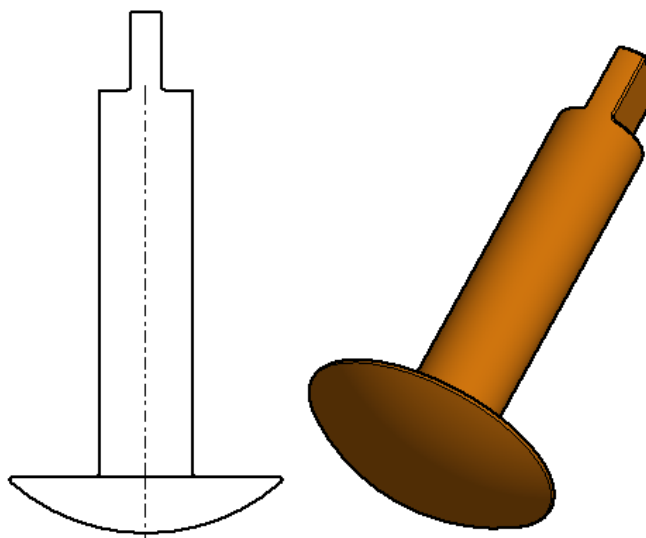
Testovací zatěžovací hlavy byly nejprve navrženy pro zatížení pomocí závaží. Jedna, která má stykovou plochu se vzorkem o velikosti přibližně 25 % vnitřní polokulové plochy vzorku. Druhá má tuto stykovou plochu o velikosti přibližně 50% vnitřní polokulové plochy vzorku. Hlavy jsou duté, pro možnost umístění závaží do tohoto prostoru. Po stranách jsou tři vystouplá žebra pro zajištění vedení v drážkách na přírubě. Zatěžovací hlavy pro závaží je možné vidět na Obr. 2.6 a Obr. 2.7. Pro testování na trhacím stroji byla poté navržena zatěžovací hlava na Obr. 2.8, která měla velikost 25 % vnitřní polokulové plochy vzorku a byla vytištěna pomocí metody FDM z materiálu PETG. Tato hlava byla nakonec zvolena pro všechna testování.



Obr. 2.6 Zatěžovací hlava o velikosti 25 % plochy vzorku

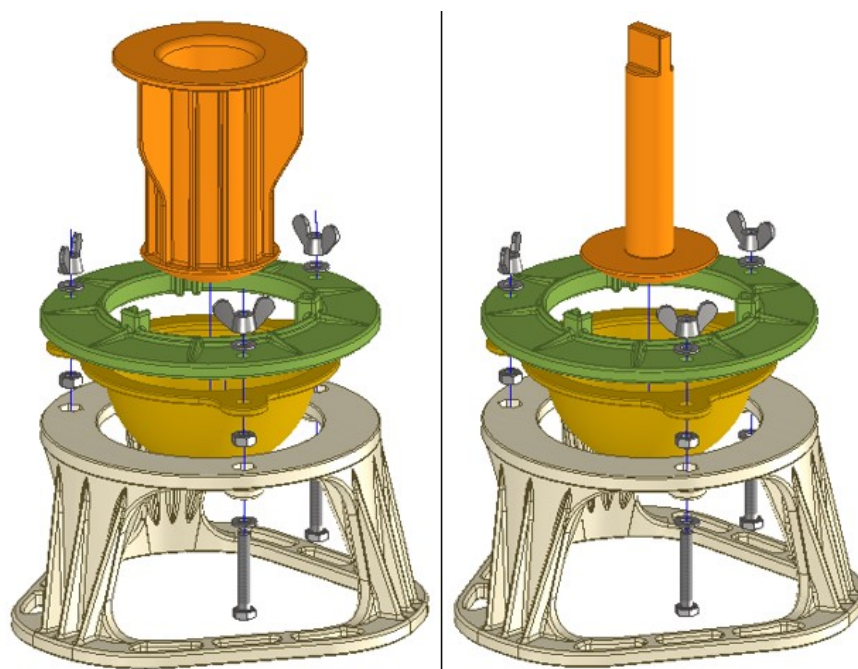


Obr. 2.7 Zatěžovací hlava o velikosti 50 % plochy vzorku



*Obr. 2.8 Zatěžovací hlava pro trhací stroj, velikost 25 % plochy vzorku*

Kompletní sestavu tohoto testovacího přípravku dále tvoří tři šrouby M8x50 ISO 4017, tři matice M8 ISO 4032, šest podložek 8 ISO 7089 a tři křídlaté matice M8 ČSN 02 1665. Schéma sestavy lze vidět na Obr. 2.9, vlevo je zobrazena sestava se zatěžovací hlavou pro závaží a vpravo pak s hlavou pro testování na trhacím stroji.

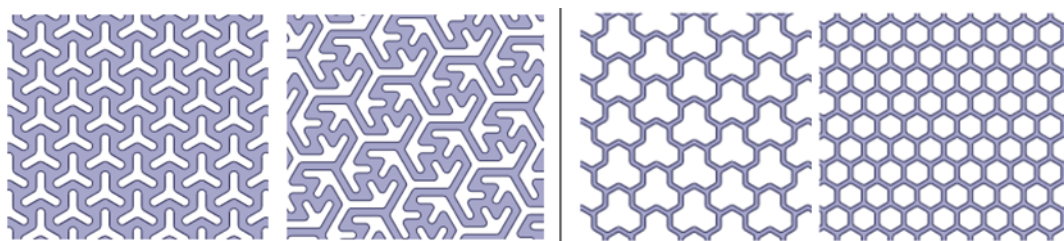


*Obr. 2.9 Schéma sestav zkušebního přípravku.*



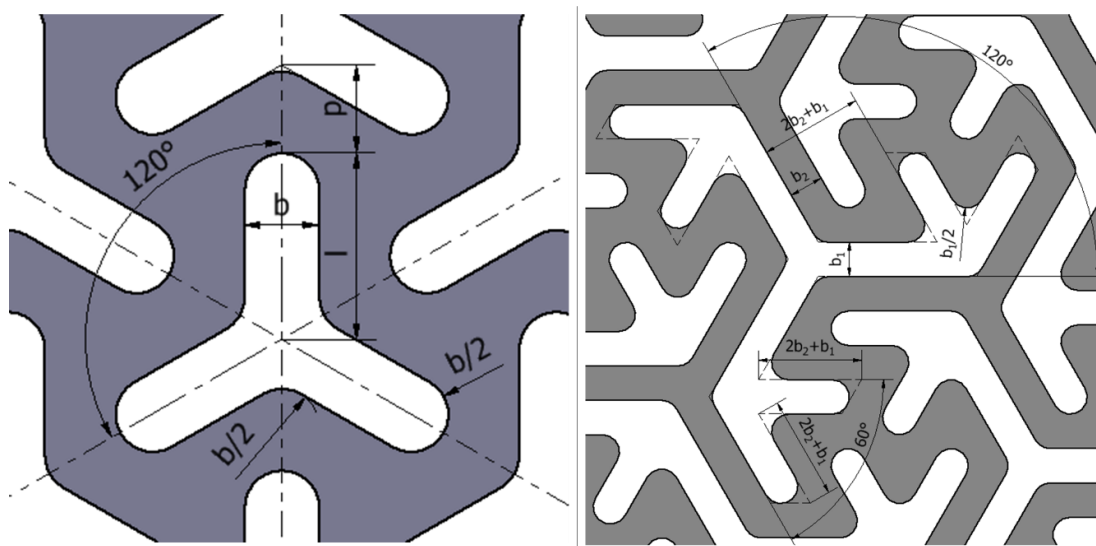
### 3 Návrh geometrie pole pružných struktur

Nejdříve byly pro testování uvažovány čtyři druhy geometrických polí pružných struktur. Jednalo se o navržené pole ve tvaru trojcípé hvězdy, pole ve tvaru modifikované trojcípé hvězdy, hexagonální pole a pole tvořené třemi spojenými hexagony – trihexagonální pole. Uvažované geometrie jednotlivých polí jsou zobrazeny na Obr. 3.1. U pole trojcípé hvězdy a trihexagonálního pole lze nalézt tři osy symetrie, u hexagonálního pole je těchto os symetrie šest a pole modifikované trojcípé hvězdy má třičetnou rotační symetrii. Dle závislosti mezi geometrickými a materiálovými vlastnostmi struktur uvedené v kapitole 1.1 by tedy mělo chování struktur tvořenými těmito poli vykazovat izotropní charakter.

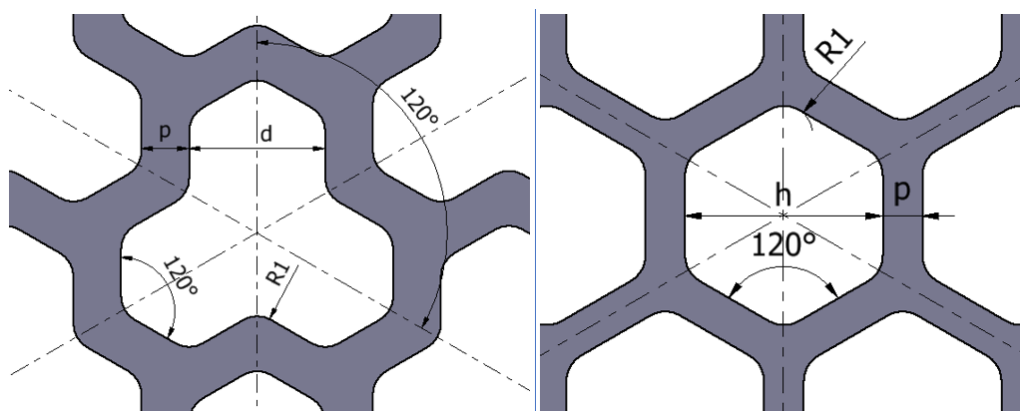


Obr. 3.1 Uvažované geometrie pole pružných struktur. Zleva: Pole trojcípé hvězdy, pole modifikované trojcípé hvězdy, trihexagonální pole a hexagonální pole.

Pro každý typ pole struktur byl připraven skript pro tvorbu geometrie v prostředí Ansys Spaceclaim. Skripty byly řízeny pomocí vstupních parametrů jednotlivých geometrií. Vstupní parametry pole trojcípé hvězdy byly  $b$ ,  $l$  a  $p$  a jsou zakótovány na Obr. 3.2 vlevo. Pole modifikované trojcípé hvězdy bylo řízeno parametry  $b_1$  a  $b_2$ , viz Obr. 3.2 vpravo. V případě trihexagonálního pole to byly parametry  $d$  a  $p$ , Obr. 3.3 vlevo a hexagonální pole bylo řízeno pomocí parametrů  $h$  a  $p$ , Obr. 3.3 vpravo. Struktury tvořené polem trojcípé hvězdy budou dále označovány jako Struktury A, struktury s polem modifikované trojcípé hvězdy budou označovány jako Struktury B, struktury tvořené trihexagonálním polem jako Struktury C a struktury s hexagonálním polem jako Struktury D. Pro fyzické testování byly nakonec připraveny a zhotoveny pouze vzorky pružných Struktur A a B.



Obr. 3.2 Geometrie pole trojcípé hvězdy a modifikované trojcípé hvězdy se zakotovanými parametry

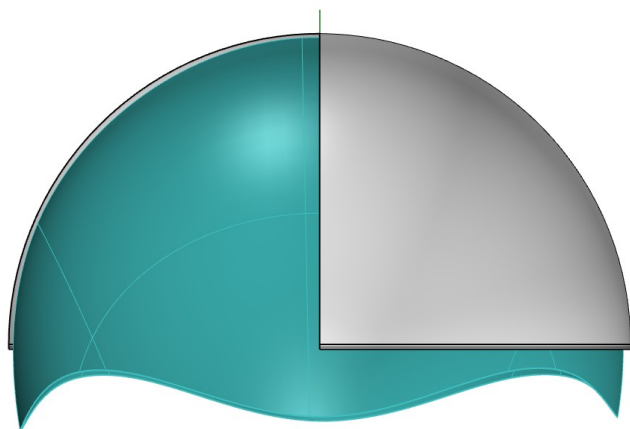


Obr. 3.3 Geometrie trihexagonálního a hexagonálního pole se zakotovanými parametry

### 3.1 Příprava modelů pro výrobu vzorků pro testování

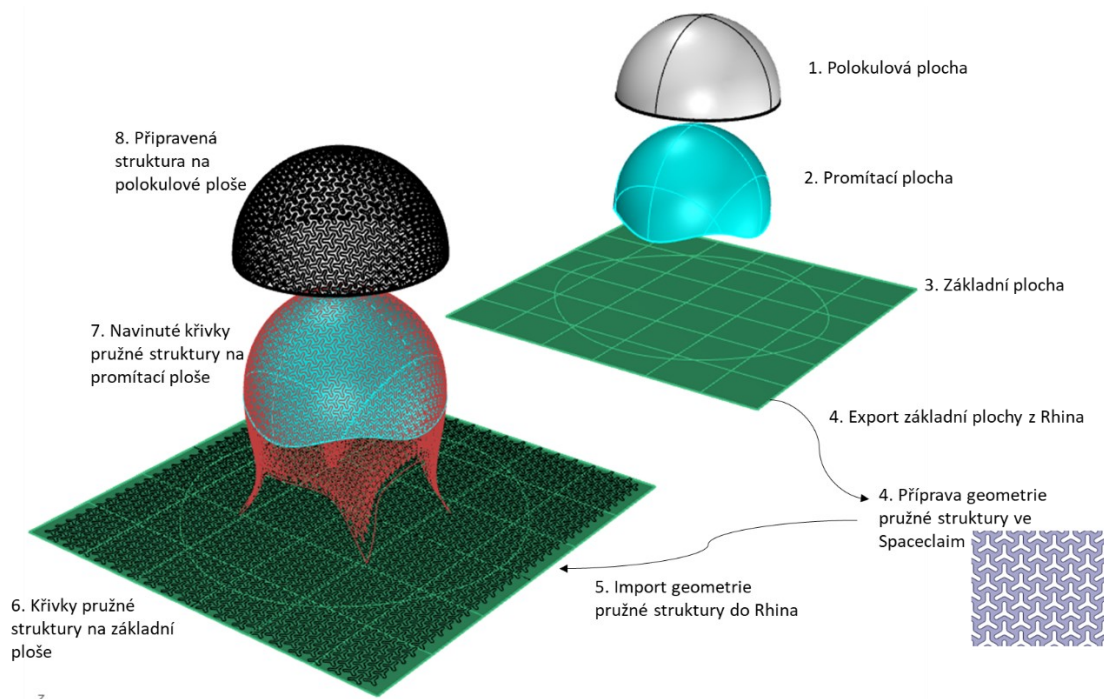
Na navrhnutém testovacím vzorku jsou pružné struktury ve tvaru polokulové plochy. Promítnutí pole struktury na sférickou plochu tak, aby nebyl tvar struktury po projekci zdeformován, je však vcelku složitý problém, jehož provedení by bylo velice pracné a není objektem zájmu této práce. Při promítnutí pole struktur na sférickou plochu za použití běžných funkcí komerčních CAD softwarů vždy dochází k často poměrně velké deformaci tvaru struktury.

Při přípravě modelů vzorků však byla kladen důraz na to, aby bylo dosaženo, co jak možno nejmenší deformace struktury. K tomuto byla použita kombinace softwarů Rhino a Ansys Spaceclaim. Nejprve byla v prostředí softwaru Rhino připravena polokulová plocha vzorku. Následně byla vytvořena pomocná plocha, která byla tvarově blízká této ploše, avšak nebyla sférická a nacházela se v těsné blízkosti polokulové plochy, dále jen promítací plocha, viz Obr. 3.4. Při promítnutí struktury na nesférickou plochu nedochází k tak výrazné deformaci tvaru struktury.



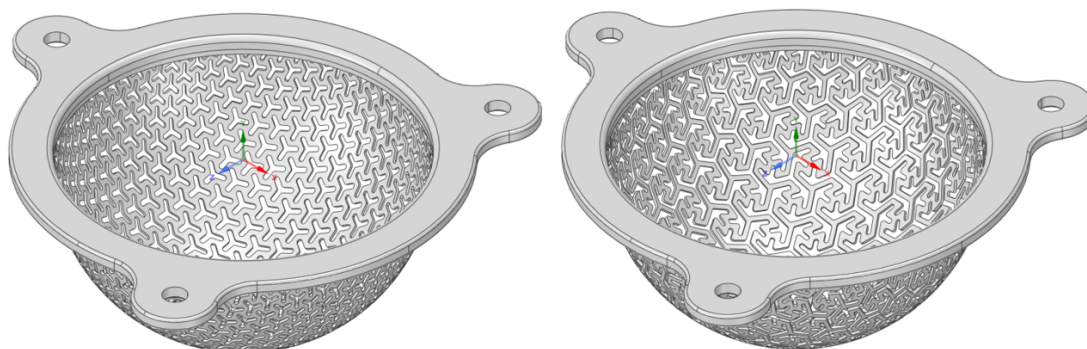
Obr. 3.4 Polokulová plocha vzorku v řezu (šedá) s promítací plochou

Promítací plocha byla tzv. rozvinuta do roviny  $XY$ , čímž byla získána hranice neoříznuté plochy, která je obdélníková, a křivky oříznutí plochy. Z rozvinuté hranice neoříznuté promítací plochy byla vytvořena rovinná plocha, dále jen základní plocha, na které byly připraveny obrysové křivky pole pružných struktur. Na základní ploše byla připravena geometrie pole pružné struktury v prostředí Ansys Spaceclaim, pomocí již zmiňovaných skriptů. Tato geometrie pole pružné struktury na základní ploše byla importována zpět do prostředí Rhino, kde byly křivky struktury navinuty ze základní plochy na plochu promítací pomocí příkazu `ApplyCrv`. Z promítací plochy byly křivky struktury pomocí příkazu `Pull` obtištěny na polokulovou plochu vzorku a z těchto křivek byly nakonec vytvořeny pružné struktury na této polokulové ploše. Kompletní postup přípravy struktury na polokulové ploše lze vidět na Obr. 3.5.



Obr. 3.5 Pracovní postup přípravy pružných struktur ve tvaru polokulové plochy vzorku

Takto vytvořené polokulové pružné struktury pak byly spojeny s připravenou geometrií okraje vzorku a tím vznikl konečný model testovacího vzorku. Následně byly připraveny STL modely pro tisk metodou SLS. Vyrobeny a testovány byly pouze vzorky Struktur typu A a B. Takto bylo rozhodnuto zejména z důvodu nákladnosti tisku vzorků.



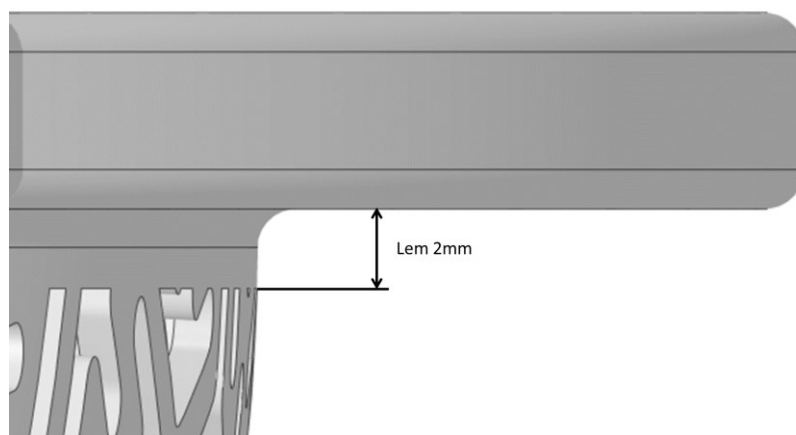
*Obr. 3.6 Připravené modely vzorků pružných struktur*

I přes výše popsany postup se však deformaci tvaru promítnuté struktury nepodařilo zcela vyhnout. To se bohužel projevilo na vytištěných vzorcích Struktur A s parametry  $b = 2,00$  mm,  $l = 5,00$  mm,  $p = 1,35$  mm, a Struktur B s parametry  $b_1 = 1,00$  mm a  $b_2 = 1,00$  mm (hodnoty parametrů platí pro pole struktur na rovinné základní ploše před promítnutím). Deformace zapříčiněná promítnutím při přípravě modelů způsobila to, že nejmenší rozměr struktury byl v určitých místech zúžen až pod minimální výrobní tloušťku stěny technologie SLS, která je 0,70 mm pro polyamid PA12 [21]. Došlo tak k prasknutí struktury v těchto místech při odstraňování vytištěných vzorků z tiskové komory, viz Obr. 3.7.



*Obr. 3.7 Prasknutý vzorek pružné struktury po tisku*

Na základě tohoto problému byly připraveny nové vzorky s lemem o výšce 2,00 mm v oblasti napojení pružné struktury na okraj vzorku, viz Obr. 3.8, a s parametry zvolenými tak, aby nejmenší šířka materiálu mezi otvory pole struktury nebyla v kritických místech menší než 1,00 mm.



Obr. 3.8 Úprava vzorků struktur

### 3.2 Volba parametrů vzorků pro testování

Upravené vzorky pružných struktur, tak aby nedošlo k jejich porušení v průběhu tisku či při post procesingu tedy měly následující zvolené parametry. Vzorek s pružnou strukturou typu A, která měla parametry pole  $b = 2,00$  mm,  $l = 5,00$  mm,  $p = 2,35$  mm byl označen jako Struktura A1. Vzorek se Strukturou typu B s parametry  $b_1 = 1,75$  mm a  $b_2 = 1,75$  mm byl označen jako Struktura B1. Obě struktury byly vytištěny v tloušťkách  $t = 1,00$  mm a  $t = 1,25$  mm. Ve skutečnosti však byla na vytištěných vzorcích tloušťka struktur proměnná. Což bylo způsobeno výrobními tolerancemi a post processingem po tisku. Rozdíl byl přibližně 0,20 mm, tzn. například u požadované tloušťky  $t = 1,00$  mm byla nejmenší reálná tloušťka  $t_r = 0,80$  mm. Přehled parametrů vytištěných a testovaných struktur je v Tab. 4.

Tab. 4 Přehled parametrů testovaných struktur

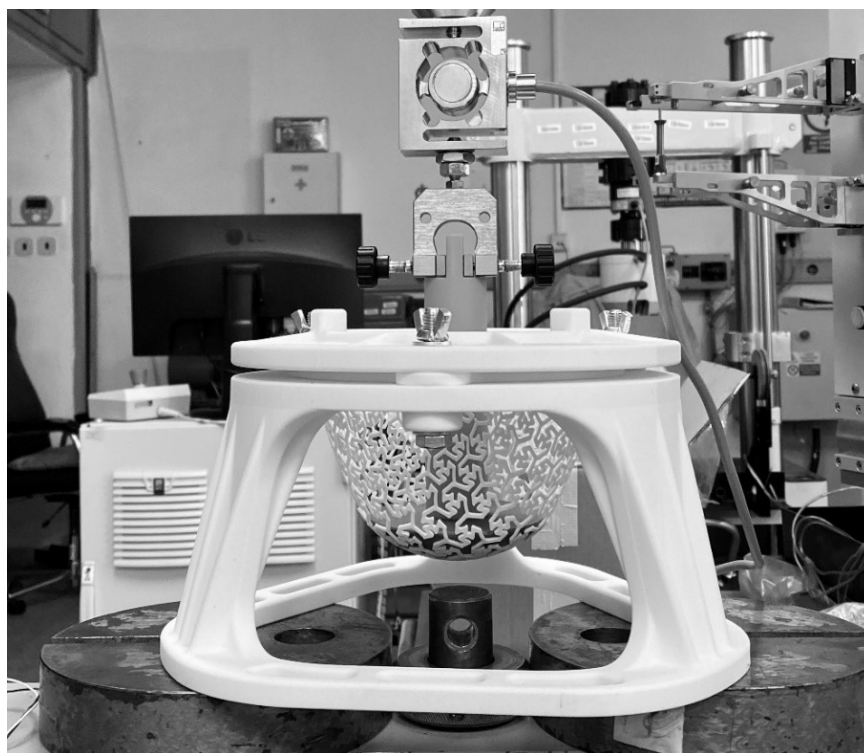
Typ struktury	Parametry struktury			
Struktura A1	$b$ [mm]	$l$ [mm]	$p$ [mm]	$t$ [mm]
	2,00	5,00	2,35	1,00
				1,25
Struktura B1	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]	-	$t$ [mm]
	1,75	1,75	-	1,00
			-	1,25

## 4 Testování vybraných struktur

Struktury byly testovány dle metodiky popsané v kapitole 2.1. To znamená, že vzorky byly upnuty v testovacím přípravku a zatěžovány přes zatěžovací hlavu uchycenou v trhacím stroji, pomocí kterého bylo zaznamenáváno jak prodloužení, tak i působící síla. Pro jednotlivé struktury však bylo nutné zvolit způsob, jak bude zatěžování řízeno.

Při testování vzorků Struktury A1 se předpokládalo, že jde o struktury tužší a bylo zvoleno zatěžování do síly 300 N při nastaveném posuvu příčnicku 10 mm/min, poté výdrž 5 minut a odlehčení rychlostí 1 mm/min. Při testování vzorků Struktury A1 byla i testována možnost měření deformace struktur pomocí digitální korelace obrazu neboli DIC.

V případě testování Struktury B1 byly vzorky zatěžovány do požadované hodnoty průhybu struktury, kdy u vzorku s tloušťkou  $t = 1$  mm ( $t_r = 0,80$  mm) to bylo do 10,00 mm a u vzorku s tloušťkou  $t = 1,25$  mm ( $t_r = 1,05$  mm) to bylo do 30,00 mm. Rychlost zatěžování v obou případech byla 10 mm/min, poté byla 30 s výdrž na požadované hodnotě průhybu s následným odlehčením stejnou rychlostí jako při zatěžování.

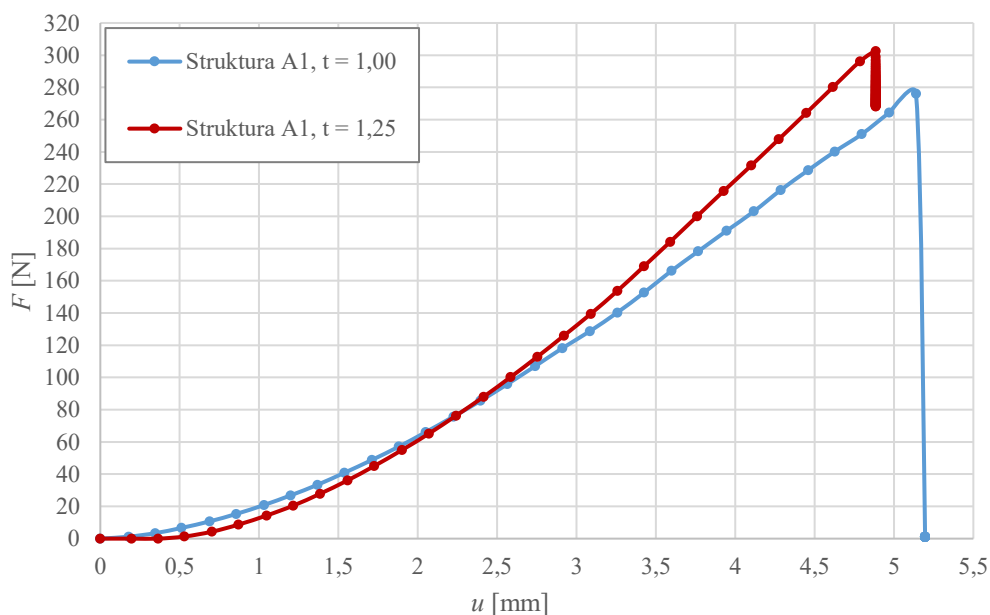


*Obr. 4.1 Testování vzorků Struktury B1*



## 4.1 Výsledky testování

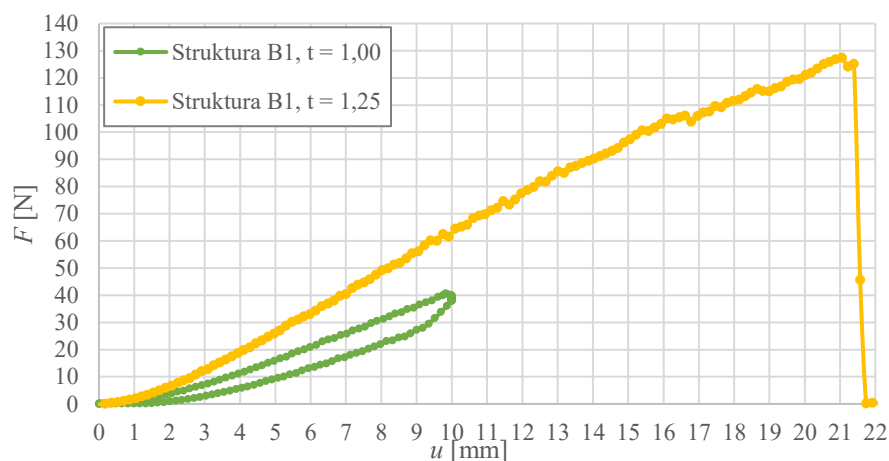
Nejprve bylo provedeno testování vzorku Struktury A1 o tloušťce  $t = 1,25$  mm ( $t_r = 1,05$  mm). V tomto případě nedošlo k porušení struktury a při zatížení 300 N byl maximální průhyb struktury 4,89 mm. Při testování vzorku o tloušťce  $t = 1,00$  mm ( $t_r = 0,80$  mm) však došlo k přetržení struktury při zatížení 276 N a průhybu 5,14 mm. Závislost působící síly na průhybu struktury obou vzorků lze vidět na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Závislosti působící síly na průhybu testovaných vzorků Struktury A1

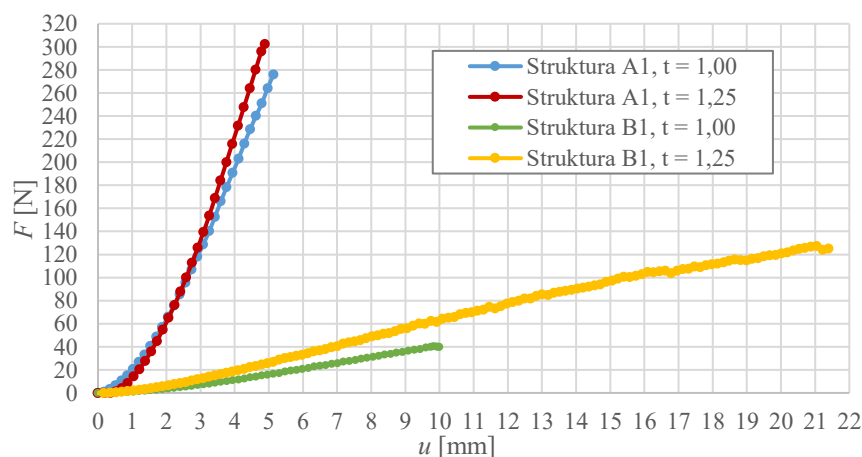
V průběhu testování vzorků Struktury A1 bylo prováděno i zkušební měření deformace struktury pomocí DIC. Podařilo se úspěšně nastavit a zkalibrovat měřicí kamery, definovat výpočetní oblast v referenčním obrazu a provést záznam zatěžování vzorku. Pro provedení úspěšného a přesného měření má však tato měřicí metoda jako každá jiná své požadavky a limity. Jedním ze zásadních předpokladů úspěšného a přesného měření je dostatečně kontrastní a jemný skvrnitý vzor na měřeném vzorku, který se deformuje spolu se vzorkem. Ten se bohužel na vzorcích nepodařilo připravit dostatečně kvalitní především z důvodu vysoké porozity 3D tištěného materiálu, která vedla k rozpití nanesených skvrn kontrastní barvy. To se negativně projevilo zejména na korelaci výsledků deformací a napětí struktury, a proto nejsou výsledky uváděny.

Dále bylo provedeno testování vzorků Struktury B1. Vzorek o tloušťce  $t = 1,00$  mm ( $t_r = 0,80$  mm), který byl zatěžován do průhybu 10,00 mm byl neporušen, a síla působící při tomto průhybu byla 40 N. Bylo zaznamenáno i odlehčení vzorku. Vzorek se stejnými parametry o tloušťce 1,25 mm (1,05 mm) byl zatěžován do průhybu 30,00 mm, avšak došlo k porušení vzorku při průhybu 21,39 mm a síle 125 N. Závislosti působící síly na průhybu testovaných vzorků Struktury B1 jsou na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 Závislosti působící síly na průhybu testovaných vzorků Struktury B1

Zaznamenané závislosti síly na průhybu všech testovaných vzorků společně jsou zobrazeny na Obr. 4.4. Zobrazeny jsou zde jen průběhy zatěžování do momentu přetržení, či výdrže na konečné hodnotě průhybu.



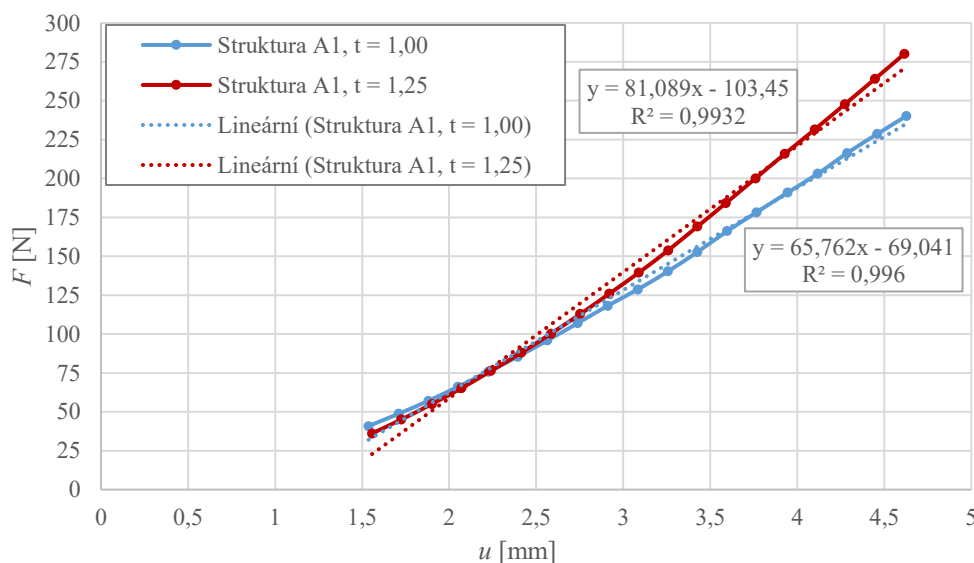
Obr. 4.4 Závislosti působící síly na průhybu všech testovaných vzorků

## 4.2 Stanovení tuhosti struktur

Z výše uvedených výsledků testování lze vidět, že struktury se na počátku zatěžování chovají nelineárně a od určité hodnoty průhybu má závislost zatěžování na průhybu téměř až lineární průběh. Hodnota průhybu, od které se struktura chová přibližně lineárně je cca 1,50 mm v případě Struktury A1 a cca 2,00 mm u Struktury B1. Tyto nelinearity na začátku zatěžování mohou být ovlivněny například špatným vystředěním vzorku na zatěžovací hlavu či usedáním vzorku v přípravku. Proto bylo rozhodnuto, že tuhost struktur byla stanovena tak, že se provedla lineární aproximace dat, které vykazovali přibližně lineární průběh. Sklon této aproximační přímky je pak tuhostí struktury.

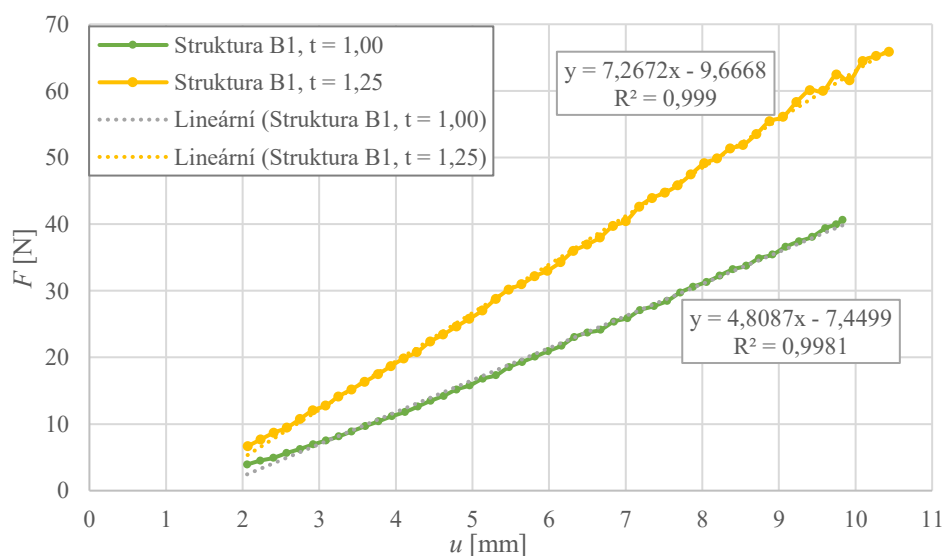


U Struktury A1 byly pro lineární aproximaci uvažovány data při průhybu struktury od 1,50 mm do 4,50 mm. Hodnota takto určené tuhosti v případě vzorku Struktury A1 o tloušťce  $t = 1,00$  mm ( $t_r = 0,80$  mm) byla 65,76 N/mm a v případě vzorku o tloušťce  $t = 1,25$  mm ( $t_r = 1,05$  mm) byla 81,09 N/mm, viz Obr. 4.5.



Obr. 4.5 Stanovení tuhosti testovaných Struktur A1

Lineární aproximace pro určení tuhostí vzorků Struktury B1 byla prováděna z dat při průhybu od 2,00 mm do 10,00 mm. Tuhost vzorku Struktury B1 o tloušťce 1,00 mm ( $t_r = 0,8$  mm) byla určena na 4,81 N/mm a o tloušťce 1,25 mm ( $t_r = 1,05$  mm) na 7,27 N/mm, viz Obr. 4.6.

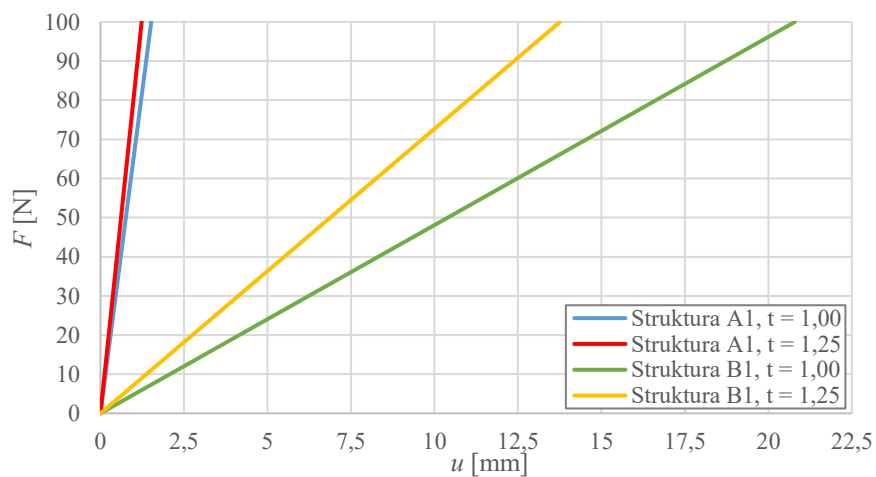


Obr. 4.6 Stanovení tuhosti testovaných Struktur B1

Stanovené tuhosti jednotlivých struktur jsou uvedeny v Tab. 5. Přímký aproximovaných tuhostí struktur jsou přesunuty do počátku a zobrazeny na Obr. 4.7.

Tab. 5 Hodnoty stanovených tuhostí struktur na základě výsledků testování

Struktura vzorku	Tloušťka vzorku $t$ [mm]	Tuhost vzorku $k_m$ [N/mm]
Struktura A1	1,00	65,76
	1,25	81,09
Struktura B1	1,00	4,81
	1,25	7,27



Obr. 4.7 Stanovené aproximované tuhosti struktur

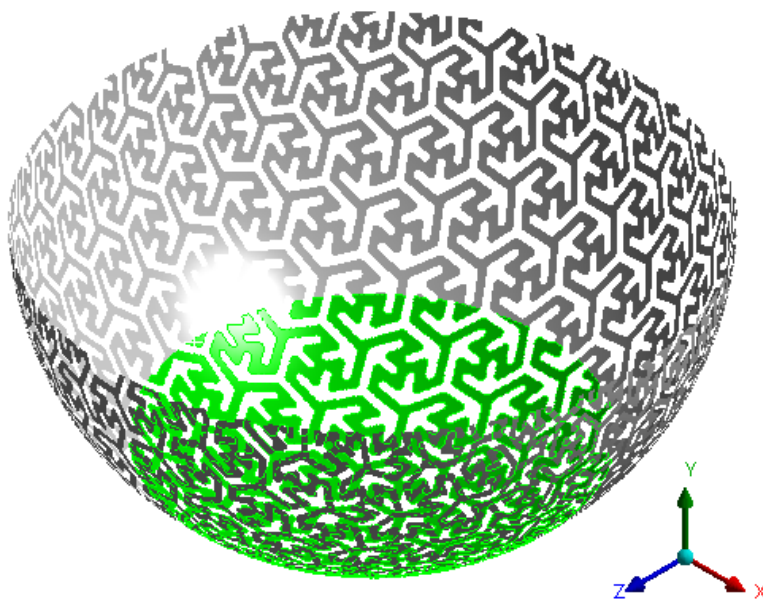
## 5 Počítačové modelování vybraných struktur

Nevýhodou fyzického testování struktur pro určení jejich tuhosti je zejména poměrně vysoká cena výroby vzorků. Proto je v této kapitole představen počítačový model vytvořený v programu Ansys Workbench 2019 R3, kterým lze tuhosti struktur stanovit a následně je pomocí něj provedena parametrická studie několika vybraných struktur.

### 5.1 Návrh počítačového modelu

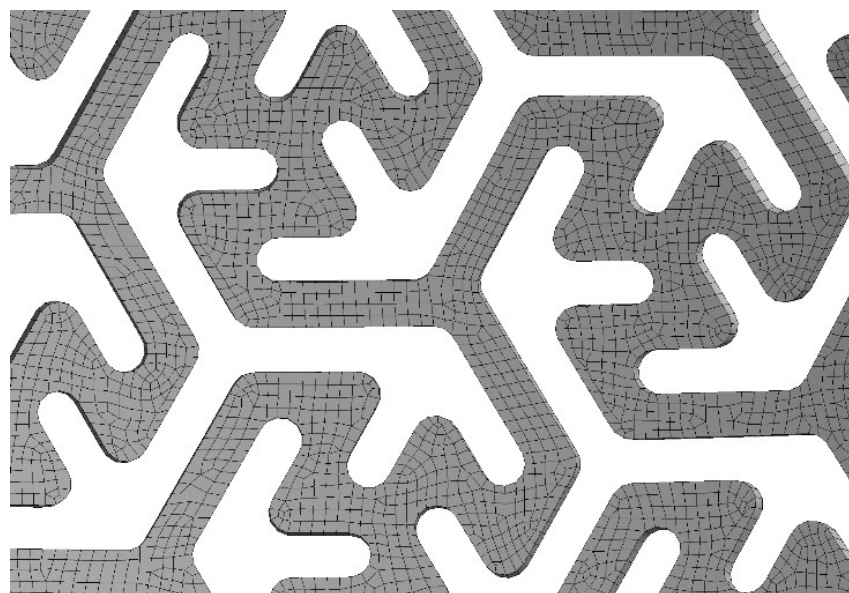
Při návrhu počítačového modelu pro stanovení tuhosti pružných struktur, bylo připraveno a vyzkoušeno několik variant. Od varianty skořepinového modelu s lineárním elastickým modelem, bez kontaktu a bez uvažování velkých posuvů až po plně nelineární variantu s kontaktem mezi strukturou a zatěžovací hlavou, uvažováním velkých deformací a elasto-plastickým materiálovým modelem. Níže představený počítačový model, byl vybrán jako ideální varianta, z pohledu přesnosti dosažených výsledků a relativně krátkého výpočetního času.

Tento počítačový model byl stejný pro všechny struktury a lišila se pouze geometrie, která závisela na typu struktury. Model je níže demonstrován na geometrii Struktury B1. Geometrii tvořila vnitřní plocha struktury testovaných vzorků, do které nebyly zahrnuty neaktivní části při deformaci struktury. Neaktivní části se nacházeli na okraji struktury v místě napojení na upínací část vzorku. Na ploše struktury byla dále připravena oblast odpovídající velikosti zatěžovací hlavy (zeleně vyznačená oblast na Obr. 5.1), kterou byly struktury zatěžovány při testování.



Obr. 5.1 Geometrie počítačového modelu Struktury B1

Na této připravené geometrii byla definována požadovaná reálná tloušťka struktury a vytvořena síť konečných prvků tvořená prvky typu SHELL181. Jedná se o lineární skořepinové prvky formulované pomocí Mindlin-Reissnerovy teorie, která zahrnuje vliv smykových napětí. Síť byla vytvořena pomocí Quadrilateral Dominant metody a je tvořena zejména čtyřúhelníkovými prvky. Velikost prvků byla nastavena na 0,50 mm. Počet prvků se pohyboval okolo 100 000 a počet uzlů byl okolo 90 000, podle typu struktury.



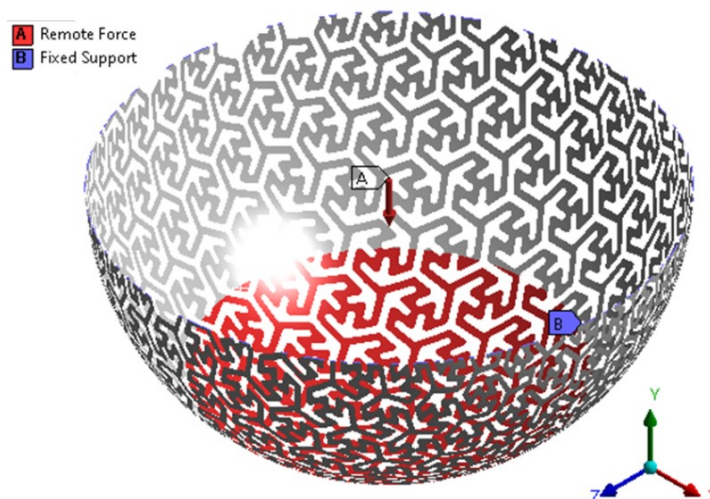
Obr. 5.2 Detail síťe konečných prvků počítačového modelu Struktury B1

Materiálový model byl pro určení tuhosti struktur uvažován izotropní lineárně elastický. Mechanické vlastnosti polymerů vyrobených 3D tiskem jsou anizotropní a závisí na orientaci součásti při tisku, ale v případě tisku metodou SLS jsou variace modulu pružnosti v tahu dle článku [22] zanedbatelné a lze uvažovat izotropní materiálový model. Použité materiálové konstanty jsou uvedeny v Tab. 6, kdy bylo vycházeno z článku [23].

Tab. 6 Použité elastické materiálové konstanty

Polyamid PA12	
$E$ [MPa]	1224
$\mu$ [-]	0,39

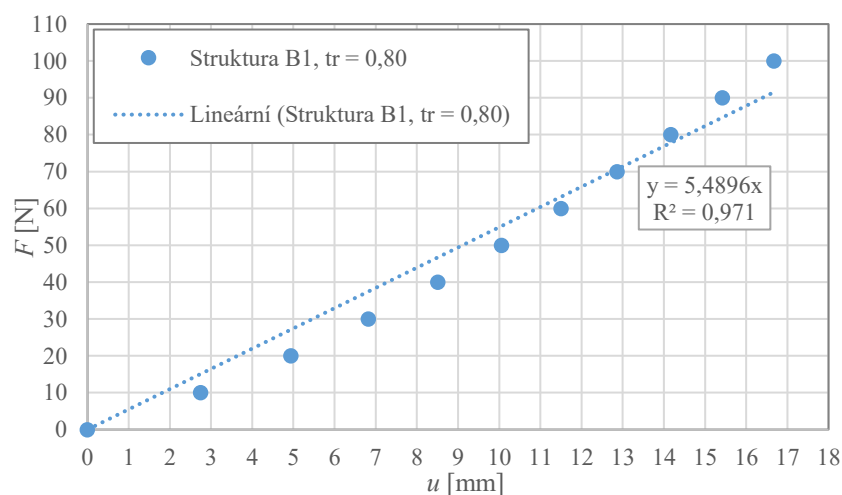
Okrajové podmínky počítačového modelu byly takové, že vrchní okraj plochy struktury byl vetknut. Ve skutečnosti v tomto místě přechází struktura v upínací část s mnohonásobně vyšší tuhostí než samotná struktura. Zatížení bylo realizováno přes Remote Force na připravenou plochu odpovídající oblasti působení zatěžovací hlavy, spojení kontrolního bodu a plochy bylo nastaveno na deformovatelné. Zadaná síla působila ve směru  $y$  a její hodnota se lišila podle typu struktury, kdy u variant struktur A a C to bylo 200 N a u variant struktury B byla hodnota 100 N.



Obr. 5.3 Okrajové podmínky počítačového modelu

Při výpočtu byly zapnuty velké posuvy a bylo nastaveno 10 mezikroků. Požadované výsledky byly hodnoty maximálního průhybu dané struktury ve směru  $y$  v závislosti na působící síle v jednotlivých mezikrocích.

Tuhost jednotlivých struktur byla určena lineární regresí výsledků výpočtu vycházející z počátku, viz příklad na Obr. 5.4.



Obr. 5.4 Příklad stanovení tuhosti u Struktury B1 na základě výsledků počítačového modelu

## 5.2 Validace počítačového modelu

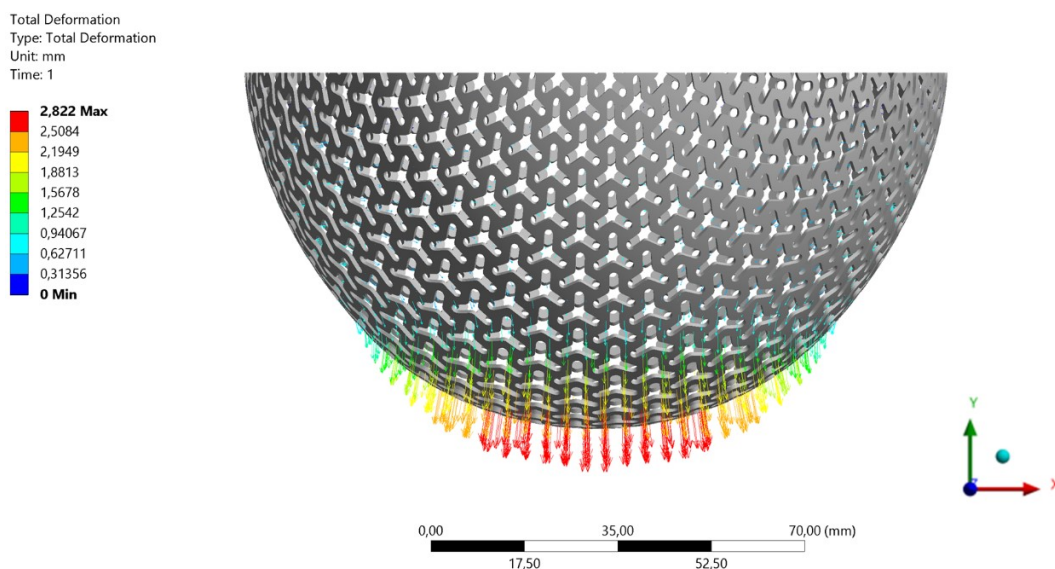
Počítačový model byl ověřen tak, že tímto modelem vypočtené hodnoty tuhosti struktur  $k_v$  byly porovnány s hodnotami stanovené tuhosti z výsledků testů  $k_m$ . Výsledky jsou porovnány v Tab. 7. Relativní rozdíl tuhostí je vypočten dle vztahu (1). Lze vidět, že hodnoty tuhostí stanovené na základě počítačového modelu  $k_v$  se oproti hodnotám stanoveným z výsledků testování  $k_m$  výrazně neliší. Maximální relativní rozdíl hodnot tuhostí je  $\Delta_k = 14,2 \%$  v případě Struktury B1, čímž bylo dosaženo uspokojivého výsledku.

$$\Delta_k = \frac{|k_v - k_m|}{k_m} \cdot 100 \quad (1)$$

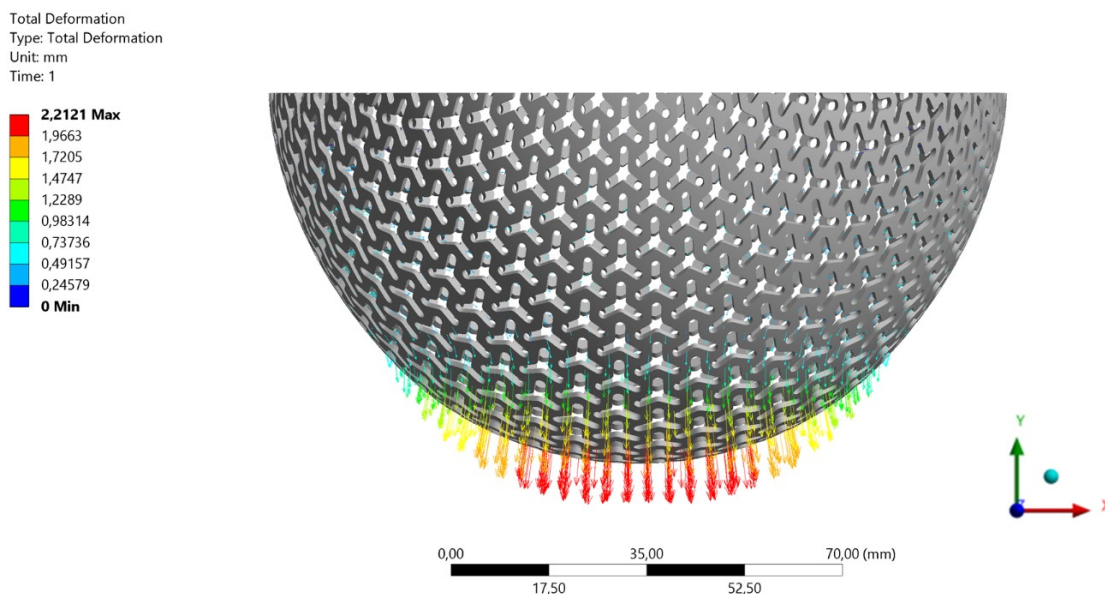
Tab. 7 Porovnání hodnot stanovených tuhostí struktur na základě měření a na základě výpočtu

Struktura	$t$ [mm]	$t_r$ [mm]	$k_m$ [N/mm]	$k_v$ [N/mm]	$\Delta_k$ [%]
Struktura A1	1,00	0,80	65,76	68,97	4,9
	1,25	1,05	81,09	88,48	9,1
Struktura B1	1,00	0,80	4,81	5,49	14,2
	1,25	1,05	7,27	6,78	6,7

Na Obr. 5.5 a Obr. 5.6 je vykresleno vektorové pole posunutí Struktury A1 odpovídající zatížení  $F = 200$  N. Vektorové pole Struktury B1 při působení zatížení  $F = 100$  N je zobrazeno na Obr. 5.7 a Obr. 5.8.

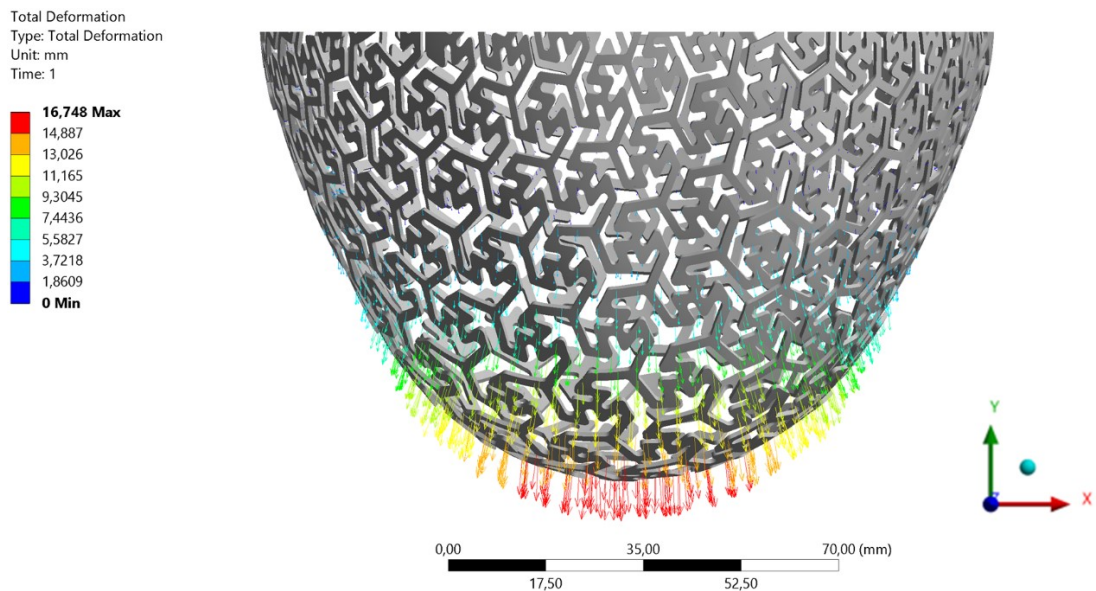


Obr. 5.5 Vektorové pole posunutí Struktury A1,  $t_r = 0,80$  mm při zatížení  $F = 200$  N

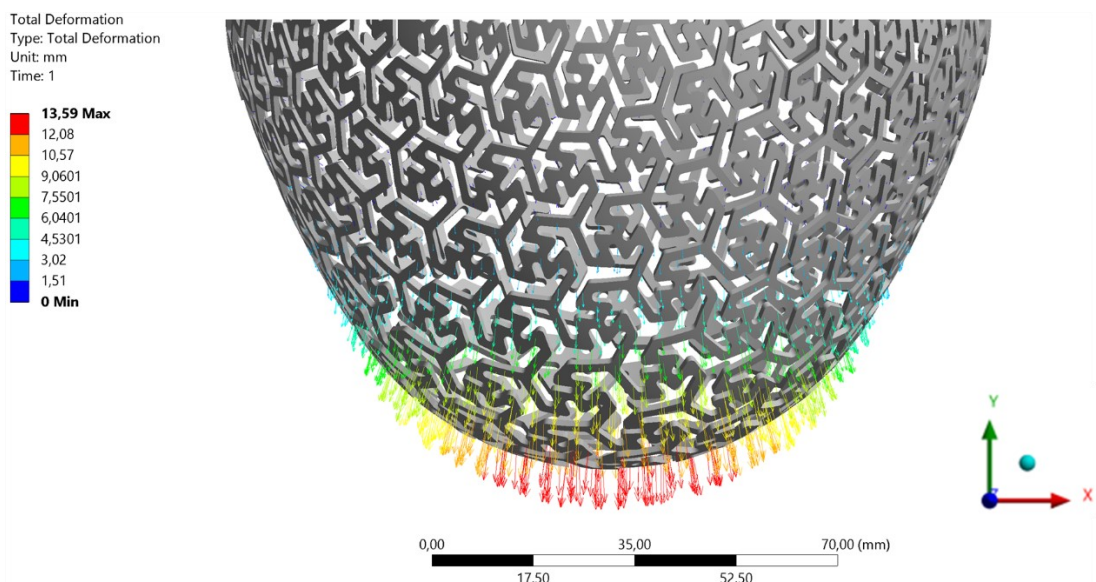


Obr. 5.6 Vektorové pole posunutí Struktury A1,  $t_r = 1,05$  mm při zatížení  $F = 200$  N





Obr. 5.7 Vektorové pole posunutí Struktury B1,  $t_r = 0,80$  mm při zatížení  $F = 100$  N



Obr. 5.8 Vektorové pole posunutí Struktury B1,  $t_r = 1,05$  mm při zatížení  $F = 100$  N

### 5.3 Parametrická studie

Parametrická studie byla provedena pro struktury typu A, B a C. Tzn. struktury s polem trojcípé hvězdy, s polem modifikované trojcípé hvězdy a trihexagonálním polem ve třech variantách parametrů struktur o pěti tloušťkách. Základní variantou parametrů struktur A a B byly parametry testovaných vzorků, které byly označeny jako Struktura A1 a Struktura B1. V případě struktury typu C byla základní varianta dána parametry  $d = 5,00$  mm a  $p = 1,75$  mm, a byla označena jako Struktura C1. V druhé variantě byla šířka materiálu mezi opakujícími se prvky struktury zvětšena o 0,25 mm, tyto varianty struktur byly označeny A2, B2 a C2. Třetí variantou bylo zvětšení parametrů otvoru opakujícího se prvku struktury o 0,25 mm a označení struktur bylo A3, B3, C3. Jelikož reálná tloušťka vytištěných vzorků byla menší než požadovaná, jak již bylo zmíněno, tak byly pro výpočet uvažovány skutečné

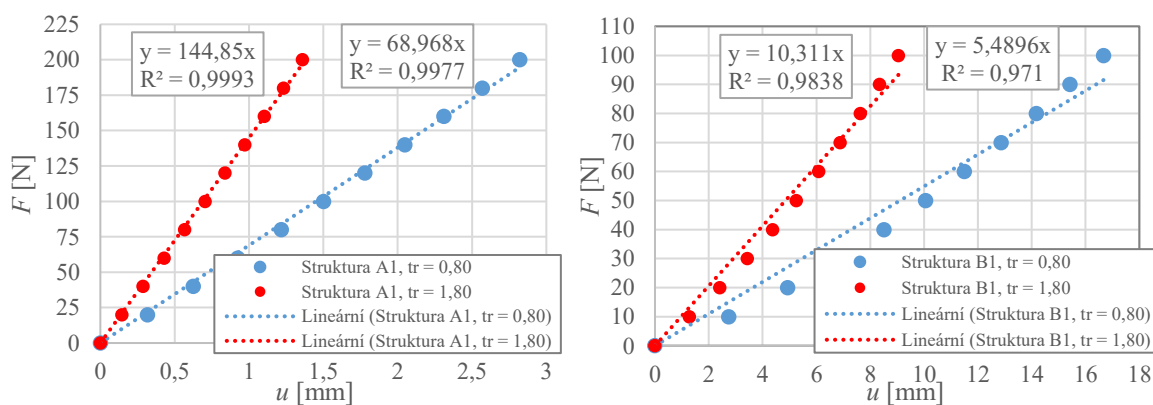
nejmenší tloušťky struktury, tj.  $t_r = 0,80$  mm a 1,05 mm. Pro sjednocení při porovnání s testováním budou dále v textu uváděny jen tyto reálné nejmenší tloušťky. Další uvažované tloušťky pro výpočet pak byly 1,30 mm; 1,55 mm a 1,80 mm. Všechny použité parametry jednotlivých variant struktur jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 Parametrická studie – použité parametry struktur

Typ struktury	Parametry struktury							
	$b$ [mm]	$l$ [mm]	$p$ [mm]	$t_r$ [mm]				
Struktura A1	2,00	5,00	2,35	0,80	1,05	1,30	1,55	1,80
Struktura A2	2,00	5,00	2,60					
Struktura A3	2,25	5,25	2,35					
	$b_l$ [mm]	$b_2$ [mm]	-					
Struktura B1	1,75	1,75	-					
Struktura B2	1,75	2,00	-					
Struktura B3	2,00	1,75	-					
	$d$ [mm]	$p$ [mm]	-					
Struktura C1	5,00	1,75	-					
Struktura C2	5,00	2,00	-					
Struktura C3	5,25	1,75	-					

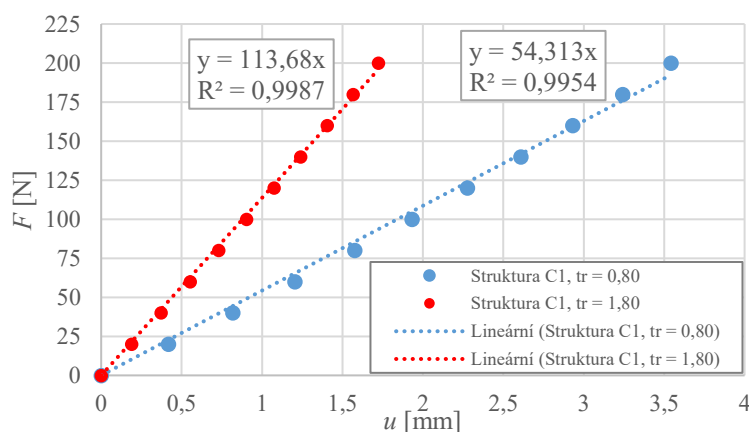
### 5.3.1 Výsledky parametrické studie

Z výsledků parametrické studie získaných představeným počítačovým modelem bylo možné pozorovat, že varianty struktur B vykazovali při zatížení více nelineární odezvu než struktury A a C a také, že s rostoucí tloušťkou se u všech struktur odezva napřimuje, což lze vidět na Obr. 5.9 a Obr. 5.10. I přesto však bylo možné spolehlivě určit tuhost jednotlivých struktur, což bylo potvrzeno v předchozí podkapitole. Na Obr. 5.9 a Obr. 5.10 je zobrazena pouze jedna varianta parametrů každé struktury v nejmenší a největší tloušťce pro lepší přehlednost.



Obr. 5.9 Výsledky počítačového modelu a určení tuhosti struktur v parametrické studii. Vlevo Struktury A1, vpravo Struktury B1. Zobrazeny data pro  $t_r = 0,8$  mm a  $t_r = 1,8$  mm.





Obr. 5.10 Výsledky počítačového modelu a určení tuhosti struktur C1 v parametrické studii. Zobrazeny data pro  $t_r = 0,80$  mm a  $t_r = 1,80$  mm.

Výsledné stanovené hodnoty tuhostí struktur parametrické studie jsou uvedeny v Tab. 9. Lze vidět, že z vybraných struktur mají největší tuhost Struktury A. Řádově podobné hodnoty tuhosti lze vidět i u Struktur C. V porovnání s těmito typy struktur pak vykazují Struktury B výrazně nižší tuhost.

Tab. 9 Stanovené hodnoty tuhostí struktur parametrické studie

Tloušťka $t_r$ [mm]	0,80	1,05	1,30	1,55	1,80
Typ struktury	Tuhost struktury $k_v$ [N/mm]				
Struktura A1	68,97	88,48	107,63	126,41	144,85
Struktura A2	83,68	107,88	131,68	155,02	177,91
Struktura A3	62,02	79,37	96,40	113,10	129,51
Struktura B1	5,49	6,78	7,98	9,16	10,31
Struktura B2	5,97	7,46	8,83	10,16	11,47
Struktura B3	4,85	6,00	7,06	8,09	9,10
Struktura C1	54,31	69,38	84,32	99,08	113,68
Struktura C2	70,24	90,45	110,51	130,31	149,86
Struktura C3	48,30	61,48	74,53	87,43	100,18

Zvětšení tloušťky struktury má na její tuhost výrazný vliv, avšak s rostoucí tloušťkou míra tohoto vlivu klesá a relativní změna tuhosti struktury je s každým krokem menší, viz Tab. 10. Při pohledu na hodnoty tuhosti Struktur A a C je patrné, že zvětšení parametrů velikosti otvoru opakujícího se prvku struktury (změna z varianty A1 na A3, respektive z C1 na C3) ovlivňuje tuhost menší mírou než zvětšení šířky materiálu mezi opakujícími se prvky struktury (změna z varianty A1 na A2, respektive z C1 na C2). Vliv zvětšení šířky materiálu je u Struktur A přibližně dvakrát větší, než vliv zvětšení opakujícího se prvku a v případě Struktur C je pak téměř třikrát větší. V případě Struktur B je vliv prakticky totožný, jak při změně šířky materiálu, tak při změně velikosti opakujícího se prvku struktury, což lze vidět v Tab. 11

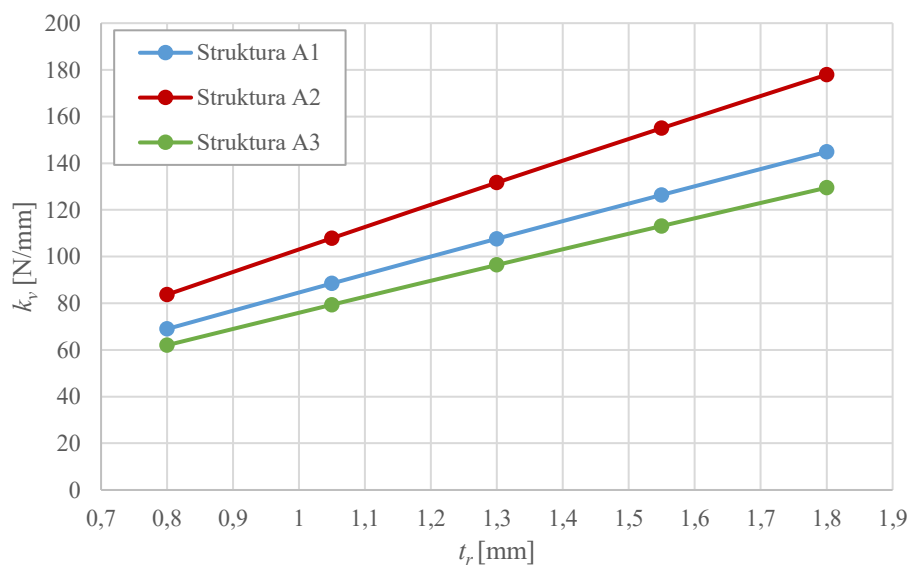
Tab. 10 Relativní změna tuhosti struktur při změně jejich tloušťky

Změna tloušťky [mm]	0,80-1,05	1,05-1,30	1,30-1,55	1,55-1,80	Průměrná změna [%]
Typ struktury	Relativní změna tuhosti [%]				
Struktura A1	28,3	21,7	17,4	14,6	20,5
Struktura A2	28,9	22,1	17,7	14,8	20,9
Struktura A3	28,0	21,5	17,3	14,5	20,3
Struktura B1	23,5	17,8	14,7	12,6	17,1
Struktura B2	24,9	18,4	15,1	12,9	17,8
Struktura B3	23,9	17,7	14,5	12,5	17,1
Struktura C1	27,7	21,5	17,5	14,7	20,4
Struktura C2	28,8	22,2	17,9	15,0	21,0
Struktura C3	27,3	21,2	17,3	14,6	20,1

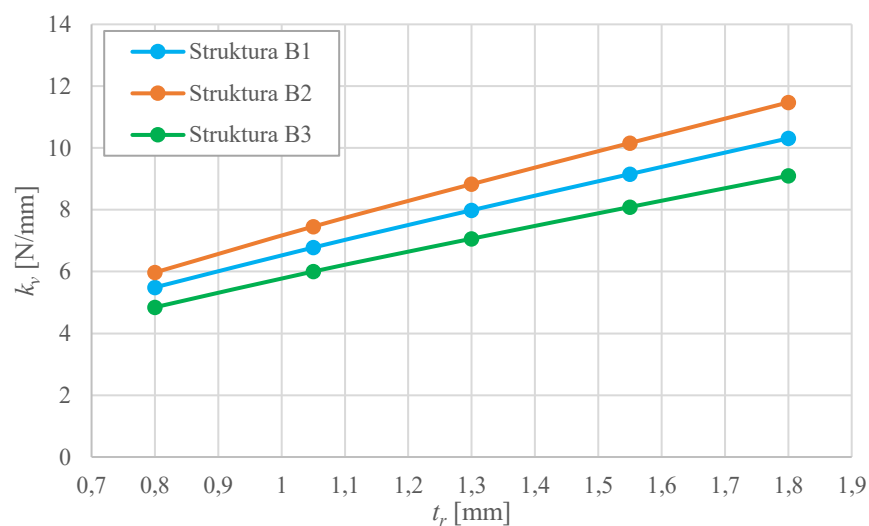
Tab. 11 Relativní změna tuhosti struktur při změně parametrů

$t_r$ [mm]	0,80	1,05	1,30	1,55	1,80	Průměrná změna [%]
Změna parametrů struktury	Relativní změna tuhosti [%]					
A1 → A2	21,3	21,9	22,3	22,6	22,8	22,2
A1 → A3	10,1	10,3	10,4	10,5	10,6	10,4
B1 → B2	8,8	10,0	10,6	11,0	11,3	10,3
B1 → B3	11,7	11,5	11,5	11,6	11,7	11,6
C1 → C2	29,3	30,4	31,1	31,5	31,8	30,8
C1 → C3	11,1	11,4	11,6	11,8	11,9	11,5

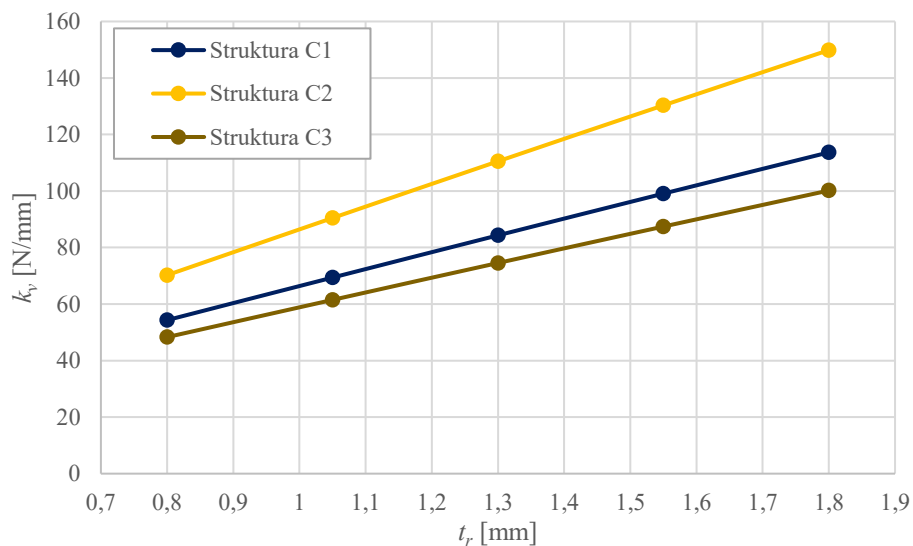
Na Obr. 5.11, Obr. 5.12 a Obr. 5.13 jsou zobrazeny závislosti tuhosti jednotlivých typů pružných struktur na jejich tloušťce, závislost všech struktur dohromady je na Obr. 5.14.



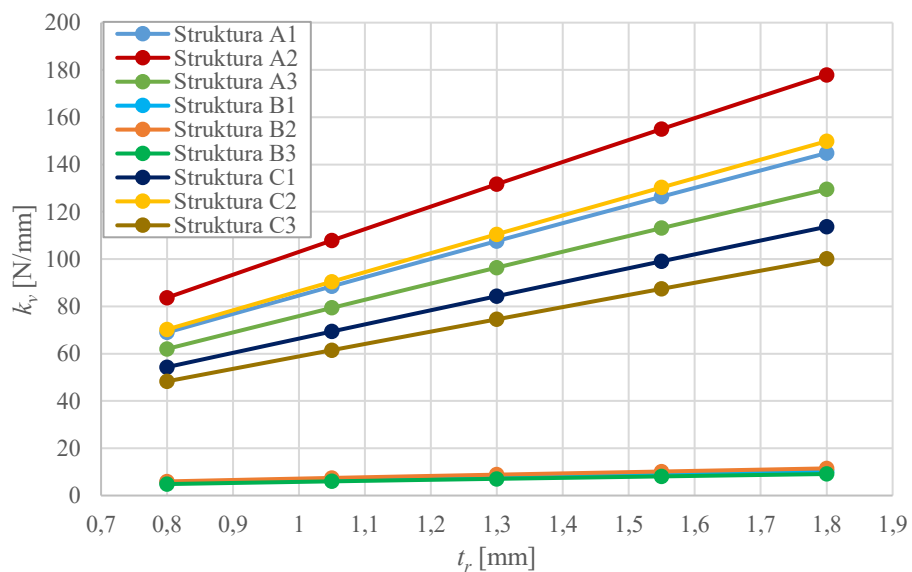
Obr. 5.11 Stanovené tuhosti variant Struktur A v závislosti na jejich tloušťce



Obr. 5.12 Stanovené tuhosti variant Struktur B v závislosti na jejich tloušťce



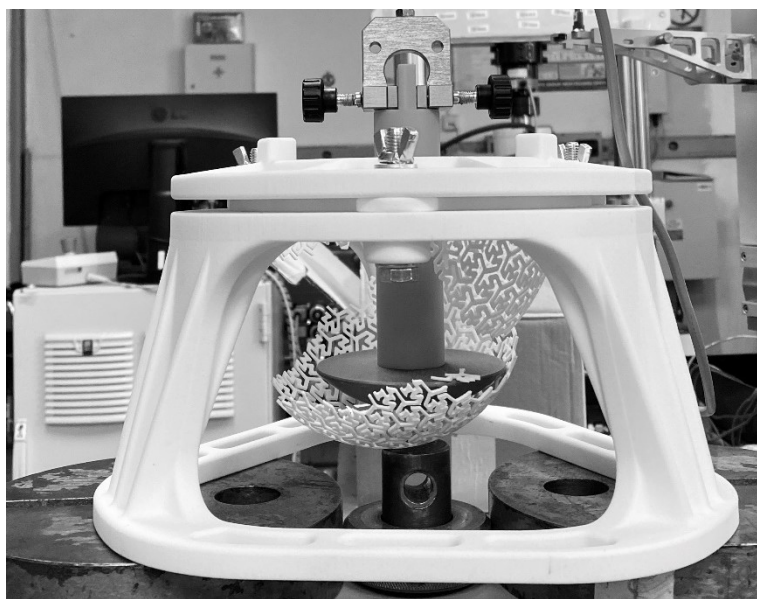
Obr. 5.13 Stanovené tuhosti variant Struktur C v závislosti na jejich tloušťce



Obr. 5.14 Stanovené tuhosti všech struktur parametrické studie v závislosti na jejich tloušťce

## 6 Modelování únosnosti vybraných struktur

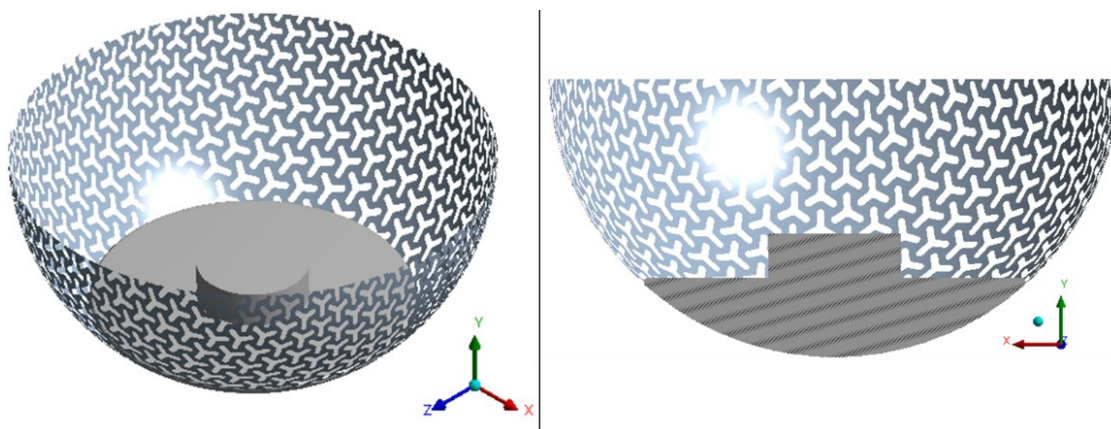
Při testování struktur často docházelo k přetržení vzorku vlivem neodhadnutí předepsaného zatížení. K přetržení docházelo v oblastech okolo okraje testovací hlavy. Proto byl připraven plně nelineární počítačový model pro výpočet únosnosti struktur. Ten byl zaměřen na struktury typu A (struktury tvořené polem trojcípé hvězdy). Výpočet únosnosti byl proveden pro tento typ struktur z důvodu potenciálního širšího využití tohoto typu struktur a také například kvůli lepšímu přiléhání struktury na těleso které ji deformuje než v případě struktur typu B (struktury tvořené polem modifikované trojcípé hvězdy), u kterých dochází k nepřiléhání a odstávání některých větví struktury. Výsledek použitého počítačového modelu byl opět ověřen porovnáním s výsledkem provedeného testu Struktury A1 o tloušťce 1,00 mm ( $t_r = 0,80$  mm), při kterém došlo k porušení vzorku. Dále byl výpočet únosnosti proveden pro další dvě varianty tohoto typu struktury se stejnými parametry jako v případě parametrické studie tuhosti, Strukturu A2 a A3, avšak jen pro jednu tloušťku struktur. To znamená tři varianty parametrů Struktury A o reálné tloušťce  $t_r = 0,80$  mm, tzn. celkem 3 výpočty únosnosti.



*Obr. 6.1 Přetržený vzorek struktury při testování*

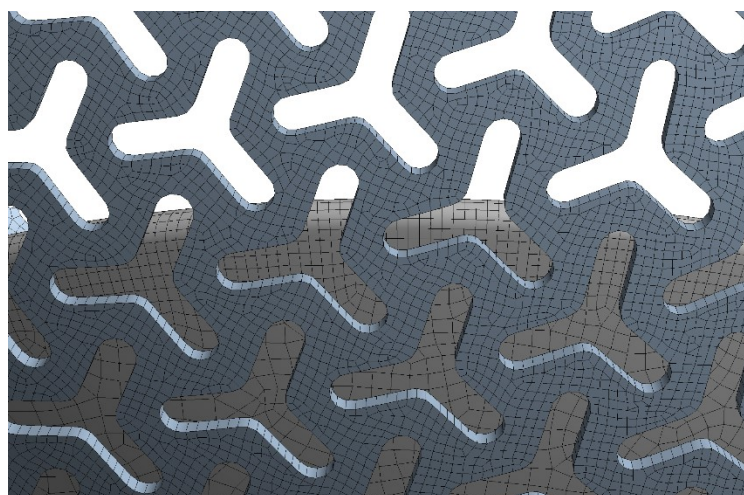
### 6.1 Počítačový model

Výpočet únosnosti byl stejně jako v případě výpočtu tuhosti realizován na skořepinovém modelu vzorků struktur. Proto byla opět základem geometrického modelu vnitřní plocha jednotlivých struktur bez jejich neaktivních částí. V tomto případě však byl geometrický model doplněn zatěžovací hlavou. Ta měla vzhledem k strukturám daleko větší tuhost, a proto byla uvažována jako absolutně tuhá. Mezi plochou struktury a zatěžovací hlavou byl uvažován kontakt bez tření.



Obr. 6.2 Geometrie počítačového modelu pro výpočet únosnosti pružných struktur

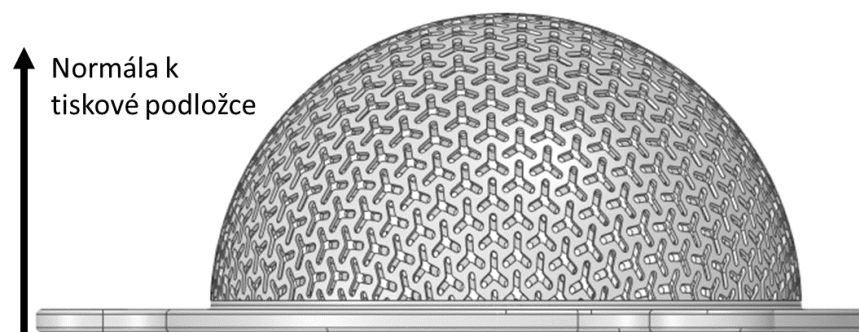
Sít' konečných prvků plochy struktury byla opět dominantě tvořena čtyřstěnnými lineárními skořepinovými prvky typu SHELL181 o nastavené délce elementu 0,5 mm. Na kontaktní ploše absolutně tuhé zatěžovací hlavy byly použity kontaktní prvky TARGE170. Celkový počet prvků a uzlů se lišil dle geometrie struktury a pohyboval se okolo 140 000 prvků a 100 000 uzlů.



Obr. 6.3 Detail sítě konečných prvků na ploše struktury a kontaktní ploše zatěžovací hlavy

Pro výpočet únosnosti jednotlivých struktur byl zvolen elasto-plastický model s izotropním zpevněním. Elastické konstanty lze u polyamidů PA12 tištěných metodou SLS považovat za izotropní, což však v případě meze pevnosti a poměrné deformace při porušení neplatí a hodnoty se liší dle orientace při tisku vzorku [22]. Hodnoty těchto materiálových konstant ve směru normály k tiskové podložce jsou výrazně nižší. Pro výpočet bylo uvažováno izotropní chování materiálu s těmito nižšími hodnotami materiálových parametrů, jelikož byly vzorky struktur tištěny ve směru zobrazeném na Obr. 6.4, a v tomto směru byly také zatěžovány. Bohužel data daného materiálu z tahové zkoušky nebyla dostupná, proto byl použit bilineární materiálový model plasticity. Materiálové konstanty použité pro výpočet byly zvoleny na základě uváděných dat v publikacích [19], [22], [23], [24] a jsou uvedeny v Tab. 12. Uvedené hodnoty napětí a poměrné deformace v Tab. 12 jsou uvažovány jako hodnoty skutečné.



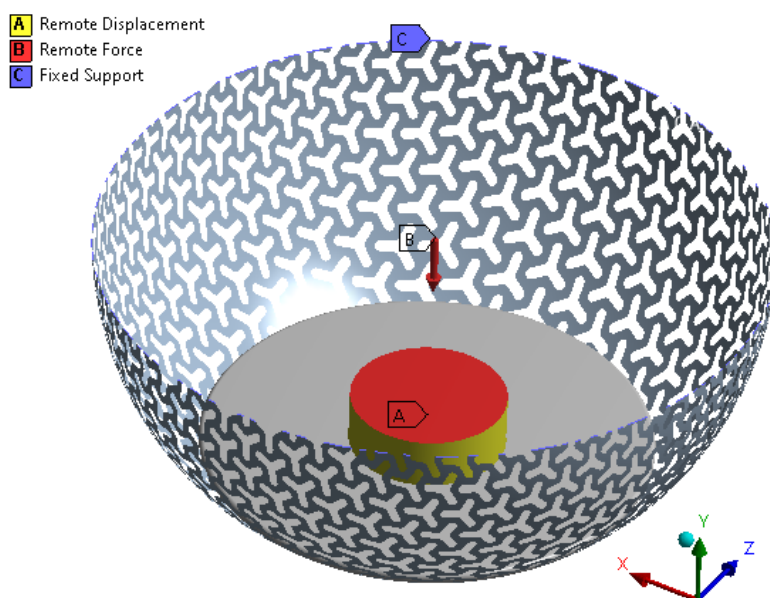


Obr. 6.4 Směr tisku vzorků

Tab. 12 Použité elasto-plastické materiálové konstanty pro výpočet únosnosti

Polyamid PA12						
$E$ [MPa]	$\mu$ [-]	$\sigma_Y$ [MPa]	$\varepsilon_Y$ [%]	$\sigma_b$ [MPa]	$\varepsilon_b$ [%]	$E_T$ [MPa]
1224,00	0,39	21,00	1,70	42,00	8,00	334,17

Ploše struktury bylo stejně jako v počítačovém modelu pro výpočet tuhostí struktur definováno vetknutí na horním okraji plochy. Zatěžovací hlavě bylo zamezeno všem rotacím a posuvům, kromě posuvu ve směru osy  $y$ . Na horní plochu zatěžovací hlavy pak bylo definováno zatížení silou ve směru  $y$  přes Remote Force. Síla byla aplikována pomocí dvou zátěžných kroků. V prvním kroku byla síla navyšována pomocí mezikroků o 30 N na určitou hodnotu, která se lišila dle varianty struktury (např. 240 N pro Strukturu A1), a v druhém kroku byla síla z této hodnoty postupně navyšována s jemnějším mezikrokem 5 N až na definovanou hodnotu, lišící se opět podle varianty struktury (např. 330 N v případě Struktury A1). Pro výpočet byly opět uvažovány reálné tloušťky struktur po tisku  $t_r$ .



Obr. 6.5 Okrajové podmínky výpočtu únosnosti struktur

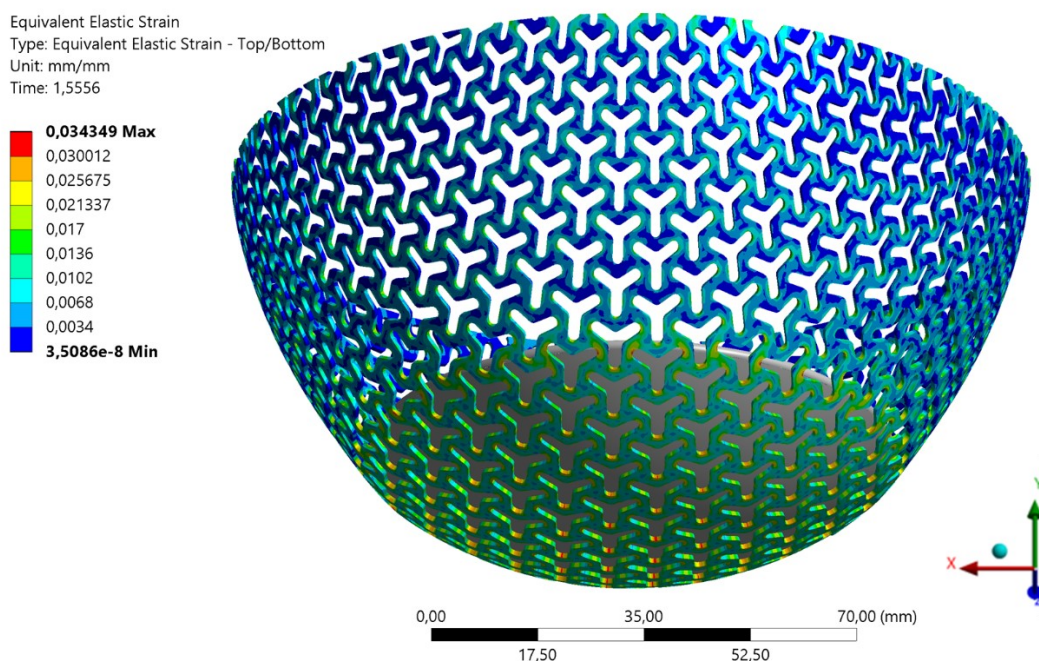
Únosnost struktury byla stanovena jako hodnota zatěžující síly v momentě, kdy hodnota ekvivalentní plastické deformace dosáhla hodnoty definované plastické deformace při přetržení  $\varepsilon_{pb}$ . Tato hodnota plastické deformace při přetržení  $\varepsilon_{pb} = 0,0457$  byla vypočtena dle vztahu (2) ze zvolených hodnot napětí při přetržení, modulu pružnosti a celkové poměrné deformace při přetržení.

$$\varepsilon_{pb} = \varepsilon_b - \frac{\sigma_b}{E} = 0,08 - \frac{42}{1224} = 0,0457 \quad (2)$$

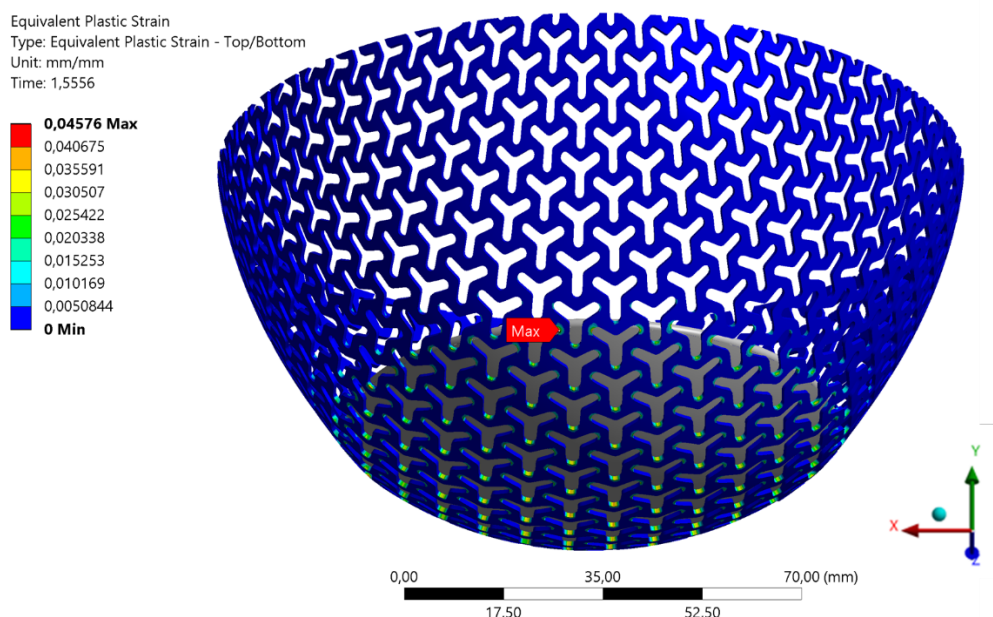
## 6.2 Výsledky výpočtu únosnosti struktur

Aby bylo možné potvrdit správnost výpočtu pomocí popsaného počítačového modelu, byl nejprve proveden výpočet Struktury A1 o tloušťce  $t_r = 0,80$  mm, na které došlo při testování k přetržení. K přetržení této struktury při testování došlo při  $F = 276$  N.

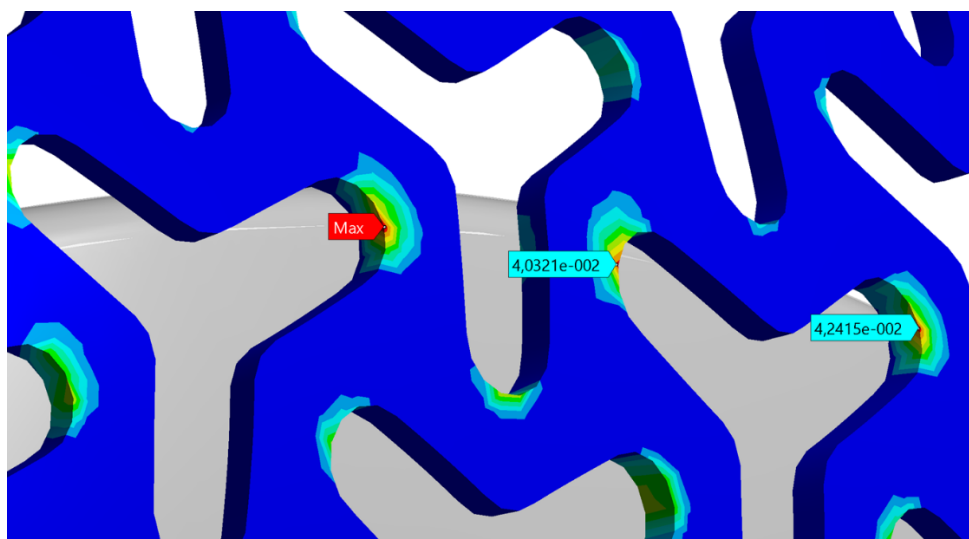
Výsledky výpočtu této Struktury A1 lze vidět na obrázcích Obr. 6.6 až Obr. 6.8, pro lepší názornost je ve výsledcích zobrazena tloušťka skořepiny. Struktura se po zatížení deformuje tak, že se jednotlivé prvky struktury v místech zaoblení rozevírají a k největším deformacím struktury dochází zejména v oblasti pod zatěžovací hlavou, viz Obr. 6.6. V oblasti pod zatěžovací hlavou pak dochází i k plastickým deformacím a největší hodnota ekvivalentní plastické deformace se nachází u okraje zatěžovací hlavy, viz Obr. 6.7 a Obr. 6.8, kde kromě rozevírání prvků struktury dochází také k dodatečnému ohybu struktury o okraj zatěžovací hlavy. Limitní plastická deformace  $\varepsilon_{pb} = 0,0457$  byla dosažena při působení síly  $F = 290$  N.



Obr. 6.6 Struktura A1,  $t_r = 0,80$  mm - Ekvivalentní elastická deformace



Obr. 6.7 Struktura A1,  $t_r = 0,80$  mm - Ekvivalentní plastická deformace



Obr. 6.8 Struktura A1,  $t_r = 0,80$  mm - Ekvivalentní plastická deformace, detail kritického místa

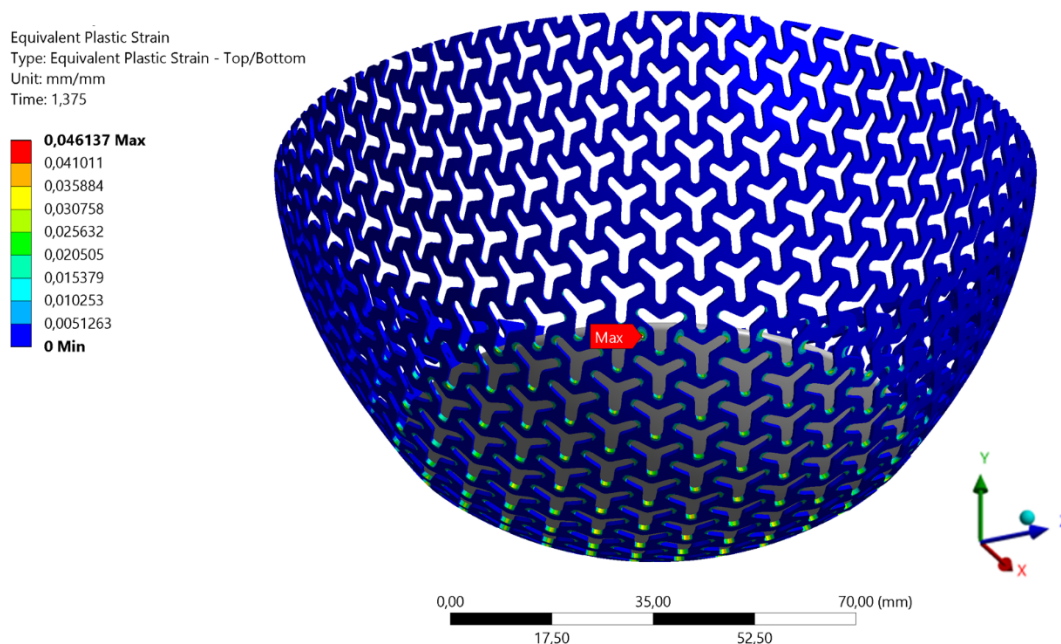
Stanovená hodnota únosnosti struktury na základě výpočtu je porovnána s únosností struktury zjištěné při testování v Tab. 13. Lze vidět, že výpočtem stanovená únosnost je o 5,1% vyšší než únosnost struktury zjištěná při měření. Místo, na kterém byla při výpočtu dosažena hodnota limitní plastické deformace se rovněž shoduje s oblastí porušení vzorku při testování. Jde o oblast u okraje zatěžovací hlavy. Na základě toho, byl považován výpočet pomocí tohoto počítačového modelu za ověřený a byly provedeny výpočty dalších dvou variant Struktury A.

Tab. 13 Porovnání stanovené únosnosti struktury výpočtem s únosností zjištěné při měření

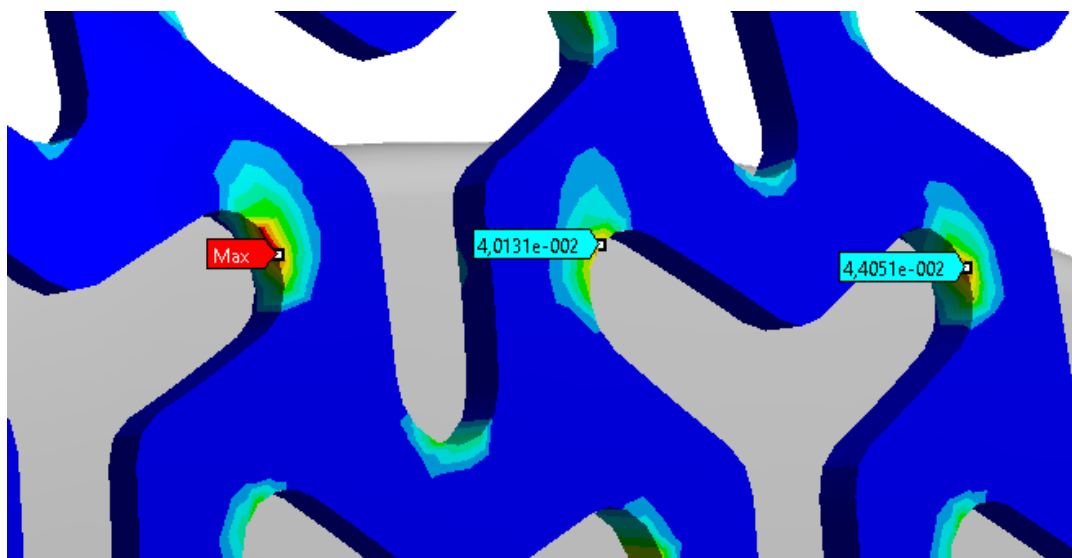
Struktura	$t_r$ [mm]	$F_{maxV}$ [N]	$F_{maxM}$ [N]	$\Delta F_{max}$ [%]
Struktura A1	0,80	290	276	5,1



V případě Struktury A2 o reálné tloušťce  $t_r = 0,80$  mm bylo deformační chování obdobné jako u předchozí varianty struktury. Únosnost byla výpočtem stanovena na hodnotu síly  $F = 345$  N. Kritické místo bylo opět u okraje zatěžovací hlavy.

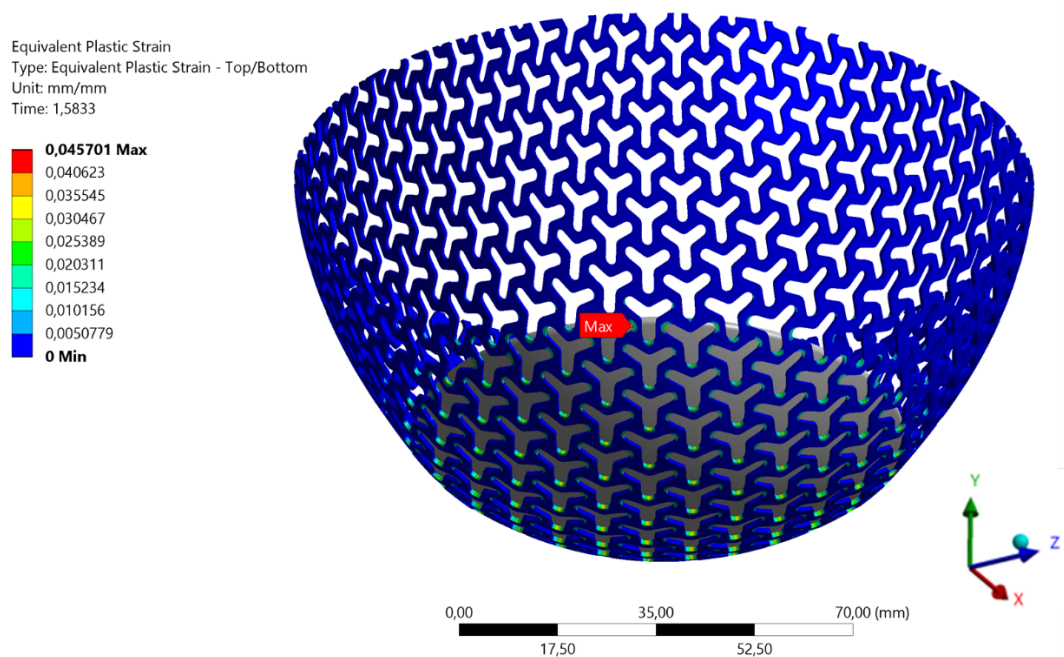


Obr. 6.9 Struktura A2,  $t_r = 0,80$  mm - Ekvivalentní plastická deformace

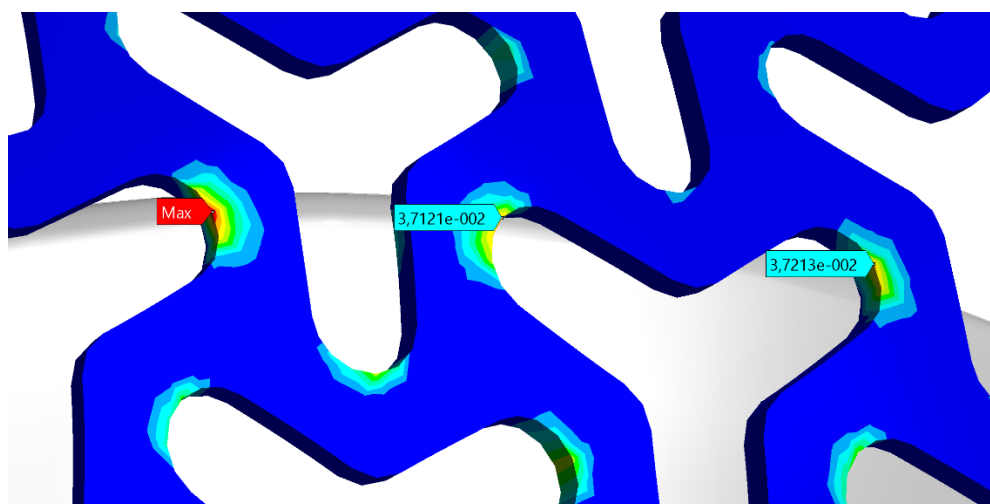


Obr. 6.10 Struktura A2,  $t_r = 0,80$  mm - Ekvivalentní plastická deformace, detail kritického místa

U Struktury A3,  $t_r = 0,80$  mm bylo deformační chování a místo s nejvyšší hodnotou ekvivalentní plastické deformace podobné jako u předchozích dvou variant. Hodnota dovolené ekvivalentní plastické deformace byla dosažena při působící síle  $F = 275$  N.



Obr. 6.11 Struktura A3,  $t_r = 0,80$  mm - Ekvivalentní plastická deformace



Obr. 6.12 Struktura A3,  $t_r = 0,80$  mm - Ekvivalentní plastická deformace, detail kritického místa

Výpočtem stanovené únosnosti jednotlivých variant Struktur A jsou uvedeny v Tab. 14.

Tab. 14 Tabulka vypočtených únosností jednotlivých variant Struktur A

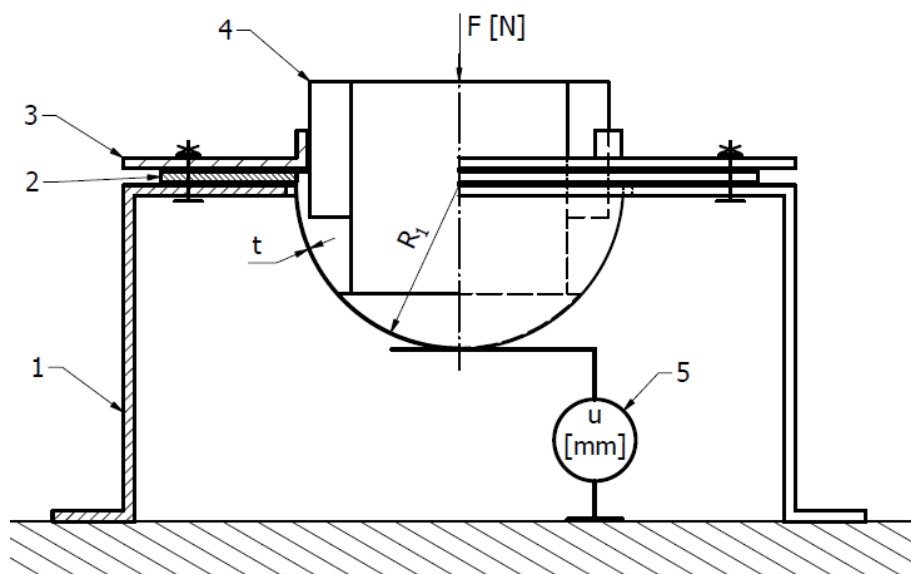
Struktura	$t_r$ [mm]	$F_{maxV}$ [N]
Struktura A1	0,80	290
Struktura A2		345
Struktura A3		275

## 7 Zhodnocení a závěr

Tato diplomová práce se zabývala počítačovým modelováním a testováním vybraných pružných struktur zhotovených metodou 3D tisku pro určení jejich tuhosti. Pružné struktury byly zhotoveny pomocí práškové metody 3D tisku SLS z atomizovaného polyamidu PA 12.

### Návrh metodiky testování

V úvodu práce byla navržena samotná metodika fyzického testování struktur a stanovení jejich tuhosti ze získaných výsledků. Podstata metody tohoto testování spočívala v postupném zatěžování navrženého vzorku struktury pomocí zatěžovacích hlav se standardizovanou velikostí a měřením průhybu zatěžované struktury. Z těchto dat průhybu struktury vzorku při daném zatížení následně byla stanovena její tuhost. Jelikož aplikace pružných struktur často nejsou rovinného charakteru, tak byl tvar struktury na vzorcích pro testování navrhnut jako polokulová plocha s definovaným vnitřním poloměrem. Vzorek dále tvořil dostatečně tuhý okraj pro upnutí do přípravku pro měření. Přípravek pro měření byl taktéž navrhnut společně se zatěžovacími hlavami ve standardizovaných velikostech. Standardizované velikosti byly cca 25 % a 50 % vnitřní polokulové plochy vzorků. Zatěžovací hlavy byly připraveny pro možné zatěžování pomocí závaží, ale také pro upnutí do trhacího stroje. Přípravek a zatěžovací hlavy pro závaží byly vyrobeny stejně jako vzorky struktur pomocí metody SLS z polyamidu PA 12. Zatěžovací hlava pro upnutí do trhacího stroje byla zhotovena pomocí metody FDM z materiálu PETG.



Obr. 7.1 Schéma navržené metodiky testování. 1 - Stojan, 2 - Vzorek, 3 - Příruba, 4 - Zatěžovací hlava,  $F$  – Požadované zatížení, 5 – Měření průhybu struktury

## Návrh testovacího vzorku

S přípravou CAD modelu vzorků s tvarem struktury jako polokulové plochy se však vyskytl komplikace. Vytvoření struktury na polokulové ploše je vcelku komplexní problém a dochází vždy k deformaci tvaru struktury při promítání na polokulovou plochu. Proto byla snaha tuto deformaci tvaru struktury za využití dostupného softwaru a znalostí co nejvíce minimalizovat. I přes snahu minimalizace však byla deformace tvaru struktury vzorku přítomna, a proto bylo nutné toto spolu s technologickými limity metody SLS zohlednit při jejich přípravě tak, aby byly vzorky zhotoveny bez případných vad.

## Testování struktur

Samotné testování bylo realizováno na trhačím stroji, kdy byla měřena působící síla a průhyb vzorku struktury, který byl shodný s posunutím příčnicku trhačího stroje. Testování bylo provedeno na vzorcích dvou typů struktur o dvou tloušťkách. Celkem tedy na čtyřech vzorcích. Naměřená data vzorků ukazovala nelineární chování struktur zejména při začátku zatěžování. Z těchto naměřených dat byla tuhost jednotlivých struktur určena lineární aproximací části dat s přibližně lineárním charakterem.

V rámci testování byla vyzkoušena i možnost měření struktur pomocí DIC. Z důvodu vysoké porozity vzorků zhotovených pomocí metody SLS však bylo obtížné připravit kvalitní kontrastní nástřik na vzorcích, což vedlo ke špatné korelaci výsledků deformace a napětí vzorku. Pro úspěšné měření by bylo nutné se důkladněji věnovat přípravě vzorků pro toto měření. Lepší kvalita kontrastního postřiku by mohla být dosažena například vyhlazením povrchu vzorku dodatečným post processing po tisku, čímž by nedocházelo k tak velkému rozptížení skvrn nástřiku. Možnou alternativou by bylo také použití přirozeně skvrnitého tiskového materiálu.

## Počítačový model

Následně byl připraven počítačový model s využitím MKP pro stanovení tuhostí struktur. Byla snaha připravit model tak, aby nebyl výpočetní čas příliš dlouhý, ale aby bylo zároveň dosaženo přibližně shodných výsledků se stanovenými tuhostmi z fyzického testování. Proto byl vytvořen model pouze činných částí struktury vzorků za použití skořepinových prvků. Materiálové vlastnosti byly uvažovány izotropní lineárně elastické,  $E = 1224 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0,39$ . Zatěžování vzorku bylo realizováno bez kontaktu, zadáním pomocí MPC. Výpočet byl ale proveden nelineární, s předpokladem velkých posuvů struktur. Výsledkem výpočtu byly data průhybu struktury při působících hodnotách zatížení. Lineární aproximací těchto dat byla následně stanovena tuhost jednotlivých struktur. Hodnoty výpočtem stanovených tuhostí se při porovnání s hodnotami tuhostí stanovených na základě testování lišili maximálně o  $\Delta_k = 14,2 \%$ , čímž bylo dosaženo uspokojivých výsledků. Tím

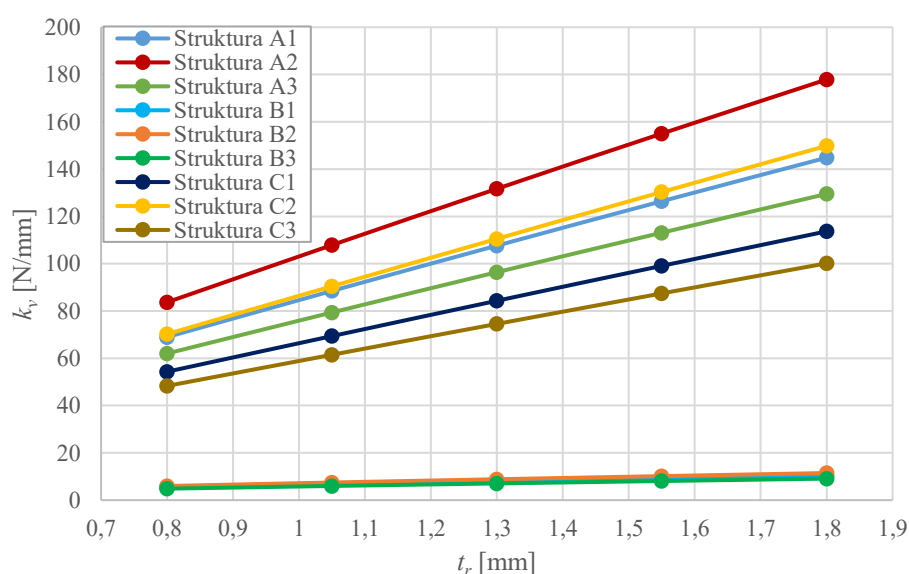
lze konstatovat, že pomocí představeného počítačového modelu lze stanovovat tuhost pružných struktur a nahradit tak případnou výrobu vzorků a jejich fyzické testování.

Tab. 15 Porovnání vypočtených hodnot tuhosti vybraných struktur  $k_v$  s hodnotami stanovenými z výsledků testů  $k_m$

Struktura	$t$ [mm]	$t_r$ [mm]	$k_m$ [N/mm]	$k_v$ [N/mm]	$\Delta_k$ [%]
Struktura A1	1,00	0,80	65,76	68,97	4,9
	1,25	1,05	81,09	88,48	9,1
Struktura B1	1,00	0,80	4,81	5,49	14,2
	1,25	1,05	7,27	6,78	6,7

## Parametrická studie

Za pomoci odladěného počítačového modelu byla poté provedena parametrická studie tuhosti vybraných typů a velikostí struktur. Byl pozorován vliv změny parametrů struktur na jejich tuhost. Zejména to, že vliv změny tloušťky struktury na její tuhost mírně klesá s každým krokem zvětšení tloušťky. Vliv ostatních parametrů uvažovaných typů struktur se lišil individuálně dle typu struktury. Nejvýraznější vliv měla změna šířky materiálu mezi opakujícími se otvory pole v případě struktur C. Změna velikosti opakujícího se otvoru pole struktur měla na tuhost struktur nejmenší vliv a ovlivňovala všechny typy struktur přibližně stejnou mírou.



Obr. 7.2 Výsledky parametrické studie – závislost vypočtené tuhosti struktur  $k_v$  na jejich tloušťce  $t_r$

## Modelování únosnosti

V poslední části byl představen počítačový model pro možné stanovení únosnosti vybraných struktur, jelikož při fyzickém testování došlo k porušení některých struktur nevhodně zvoleným zatížením. Základem tohoto počítačového modelu byly opět aktivní části struktury vzorku. Byly použity skořepinové prvky, zatěžování bylo aplikováno na geometrii zatěžovací hlavy, která byla uvažována jako absolutně tuhá a mezi zatěžovací

hlavou a plochou struktury byl uvažován kontakt bez tření. Vlastnosti materiálu byly doplněny o bilineární elasto-plastický model s izotropním zpevněním,  $\sigma_Y = 21,00$  MPa a  $E_T = 334,17$  MPa. Výpočet byl proveden na jednom ze vzorků struktury, na kterém došlo při testování k jeho porušení. Únosnost byla stanovena jako hodnota působící síly při dosažení definované mezní hodnoty plastické deformace. Výpočtem stanovená únosnost byla o  $\Delta F_{max} = 5,1$  % vyšší než v případě testování, což byl uspokojivý výsledek. To vedlo k uspokojivému výsledků v případě tohoto typu struktury, avšak u jiných typů struktury by takto uspokojivé výsledky nemuseli být dosaženy. Výhodné by bylo tedy provést tahovou zkoušku materiálu PA12 a použít jiný přesnější elasto-plastický model, který by byl kalibrován na základě dat z tahové zkoušky. Případně uvažovat i anizotropní materiálové chování. Reálná únosnost struktury se může rovněž lišit a být ovlivněna případnými vadami struktury vzniklými při výrobním procesu metody SLS, porozitou vytištěného materiálu či podílem recyklovaného prášku při tisku.

Tab. 16 Porovnání výpočtem stanovené únosnosti struktury  $F_{maxV}$  s únosností zjištěné při měření  $F_{maxM}$

Struktura	$t_r$ [mm]	$F_{maxV}$ [N]	$F_{maxM}$ [N]	$\Delta F_{max}$ [%]
Struktura A1	0,80	290	276	5,1

## Využití výsledků

Na základě prezentovaných výsledků lze konstatovat, že se podařilo vytvořit a otestovat metodiku testování pro stanovení tuhosti pružných struktur a zároveň navrhnout validovaný počítačový model pro výpočet tuhosti struktur vyrobených pomocí práškové metody 3D tisku SLS.

Získané výsledky mohou být použity při návrhu biomedicínských či jiných aplikací, při kterých jsou kladeny požadavky na určitou tuhost použitých struktur.

Výsledky provedené parametrické studie budou sloužit k vytvoření databáze tuhosti struktur, ve které budou uvedeny tuhosti pro různé velikosti rozdílných typů struktur. Za pomoci této databáze bude výběr vhodného typu struktury při návrh produktů s použitím pružných struktur usnadněn a urychlen.

Navazující práce by se mohla zabývat strukturami vyrobenými z jiných vhodných materiálů jako je například TPU, což umožňují metody FDM či MJF, či modelováním a navrhnutím metodiky testování pro určení tuhosti prostorových struktur. Další možností by také bylo vytvoření zmiňovaných tabulek tuhosti struktur.

Výsledky této práce byly použity k vytvoření článku pro 58. mezinárodní konferenci Experimentální analýza napětí EAN 2020.

## Seznam použité literatury

- [1] KRÁLOVÁ, Magda. Teselace. *Eduportál Techmania* [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/matematika/geometrie/teselace>
- [2] MCLEAN, Tom. Tutorial. *Isohedral Tilings and their Templates* [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.jaapsch.net/tilings/mclean/html/tutorial.html>
- [3] SCHUMACHER, Christian, Steve MARSCHNER, Markus CROSS a Bernhard THOMASZEWSKI. Mechanical characterization of structured sheet materials. *ACM Transactions on Graphics*. 2018, 37(4), 1-15. DOI: 10.1145/3197517.3201278. ISSN 07300301. Dostupné také z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3197517.3201278>
- [4] MARŠÁLEK, Pavel, Aleš GRYGAR, Tomáš KARÁSEK a Tomáš BRZOBOHATÝ. *Virtual prototyping of 3D printed cranial orthoses by finite element analysis*. 2019, 320010-. DOI: 10.1063/1.5114332. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5114332>
- [5] PÉREZ, Jesús, Bernhard THOMASZEWSKI, Stelian COROS, Bernd BICKEL, José A. CANABAL, Robert SUMNER a Miguel A. OTADUY. Design and fabrication of flexible rod meshes. *ACM Transactions on Graphics*. 2015, 34(4), 138:1-138:12. DOI: 10.1145/2766998. ISSN 07300301. Dostupné také z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2809654.2766998>
- [6] PANETTA, Julian, Qingnan ZHOU, Luigi MALOMO, Nico PIETRONI, Paolo CIGNONI a Denis ZORIN. Elastic textures for additive fabrication. *ACM Transactions on Graphics*. 2015, 34(4), 135:1-135:12. DOI: 10.1145/2766937. ISSN 07300301. Dostupné také z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2809654.2766937>
- [7] BICKEL, Bernd, Moritz BÄCHER, Miguel A. OTADUY, Hyunho Richard LEE, Hanspeter PFISTER, Markus GROSS a Wojciech MATUSIK. Design and fabrication of materials with desired deformation behavior. *ACM SIGGRAPH 2010 papers on – SIGGRAPH '10*. New York, New York, USA: ACM Press, 2010, 2010, 1-. DOI: 10.1145/1833349.1778800. ISBN 9781450302104. Dostupné také z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1833349.1778800>
- [8] SCHUMACHER, Christian, Bernhard THOMASZEWSKI a Markus GROSS. Stenciling: Designing Structurally-Sound Surfaces with Decorative Patterns. *Computer Graphics Forum*. 2016, 35(5), 101-110. DOI: 10.1111/cgf.12967. ISSN 01677055. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1111/cgf.12967>

- [9] ION, Alexandra, Johannes FROHNHOFEN, Ludwig WALL, et al. Metamaterial Mechanisms. *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology – UIST '16*. New York, New York, USA: ACM Press, 2016, 2016, 529-539. DOI: 10.1145/2984511.2984540. ISBN 9781450341899. Dostupné také z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2984511.2984540>
- [10] LI, Tiantian, Yanyu CHEN, Xiaoyi HU, Yangbo LI a Lifeng WANG. *Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties*. 2018, 142, 247-258. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.034. ISSN 02641275. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026412751830042X>
- [11] What is 3D printing? The definitive guide. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
- [12] ČSN EN ISO/ASTM 52900. *Aditivní výroba - Obecné zásady - Terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 32 s. Třídící znak 01 1822.
- [13] REDWOOD, Ben. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>
- [14] VAROTSIS, Alkaïos Bournias. Introduction to FDM 3D printing. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [15] VAROTSIS, Alkaïos Bournias. Introduction to SLS 3D printing. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>
- [16] VAROTSIS, Alkaïos Bournias. HP MJF vs. SLS: A 3D Printing Technology Comparison. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/>
- [17] 3D TISK HP Jet Fusion – Výroba. *3Dees* [online]. [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/hp-jetfusion-3d>
- [18] Ultimaker material guides. *Ultimaker* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/resources/manuals/materials>



- [19] *EOS Material Data Center* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://eos.materialdatacenter.com/eo/en>
- [20] Ultrasint® TPU01 | Thermoplastic Polyurethane Powder. *BASF – Global Home* [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: [https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/locations/europe/german-companies/basf-3d-printing-solutions-gmbh/powders/Ultrasint\\_TPU01.html](https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/locations/europe/german-companies/basf-3d-printing-solutions-gmbh/powders/Ultrasint_TPU01.html)
- [21] OCEANZ, Sales. How to design parts for SLS 3D Printing. *3D Hubs* [online]. [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sls-3d-printing/>
- [22] LAMMENS, Nicolas, Ives DE BAERE a Wim VAN PAEPEGEM. On the orthotropic elasto-plastic material response of additively manufactured polyamide 12. *7th bi-annual international conference of Polymers & moulds innovations* [online]. 2016 [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <https://biblio.ugent.be/publication/8086754>
- [23] STOIA, Dan, Emanoil LINUL a Liviu MARSAVINA. Influence of Manufacturing Parameters on Mechanical Properties of Porous Materials by Selective Laser Sintering. *Materials* [online]. 2019, 12(6) [cit. 2020-01-30]. DOI: 10.3390/ma12060871. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/6/871>
- [24] BLAŤÁK, Petr. *Mechanické testování plastových vzorků vyrobených 3D tiskem* [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/129343>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlovi Maršálkovi, Ph. D. za odborné vedení, podporu a cenné rady při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Františkovi Fojtíkovi, Ph.D., doc. Ing. Radimovi Halamovi, Ph.D. a doc. Ing. Martinovi Fuskovi, Ph.D. za pomoc při realizaci testování vzorků. Poděkování taktéž patří mé rodině a přítelkyni za jejich velikou podporu během mého studia.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu TAČR TN01000024 - Národní centrum kompetence - Kybernetika a umělá inteligence, dílčí projekt Automatizace a optimalizace výrobních systémů (2019-2020) a byla částečně podpořena grantem v rámci studentské grantové soutěže (SGS) s číslem SP2020/23, VŠB - Technická univerzita Ostrava, Česká Republika.